

VŠB – Technická univerzita Ostrava
Fakulta elektrotechniky a informatiky
Katedra elektroenergetiky

Kompenzace jalové energie v sítích vn a nn

**Reactive Power Control in Industrial and
Distribution Networks**

VŠB - Technická univerzita Ostrava
Fakulta elektrotechniky a informatiky
Katedra elektroenergetiky

Zadání bakalářské práce

Student:

Filip Čech

Studijní program:

B2649 Elektrotechnika

Studijní obor:

3907R001 Elektroenergetika

Téma:

Kompenzace jalové energie v sítích vn a nn.
Reactive Power Control in Industrial and Distribution Networks.

Jazyk vypracování:

čeština

Zásady pro vypracování:

1. Teoretický rozbor průmyslových a distribučních sítí
2. Možnosti kompenzace jalového výkonu
3. Technické prostředky kompenzace
4. Stanovení parametrů kompenzačního prostředku.
5. Příklad návrhu kompenzace.

Seznam doporučené odborné literatury:

1. Santarius, P.: Elektrické stanice a vedení, Skripta VŠB-TU Ostrava, 1990
2. Hodinka, M.: Přenos a rozvod elektrické energie, SNTL, 1989
3. Trojáněk, Z.: Přechodné jevy v elektrizačních soustavách, SNTL 1987
4. Dohnálek, P.: Ochrany pro průmysl a energetiku, SNTL, 1991
5. Normy, firemní literatura, předpisy a směrnice ČEZ, a.s.

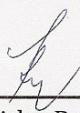
Formální náležitosti a rozsah bakalářské práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

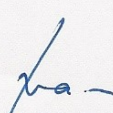
Vedoucí bakalářské práce: **doc. Dr. Ing. Jiří Gurecký**

Datum zadání: 01.09.2018

Datum odevzdání: 30.04.2019




prof. Ing. Stanislav Rusek, CSc.
vedoucí katedry


prof. Ing. Pavel Brandštetter, CSc.
děkan fakulty

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracoval samostatně. Uvedl jsem všechny literární prameny a publikace, ze kterých jsem čerpal.

V Ostravě dne 24. 4. 2019



.....

Filip Čech

Poděkování

Tímto bych chtěl rád poděkovat svému vedoucímu bakalářské práce doc. Dr. Ing. Jiřímu Gureckému za jeho odborné a cenné rady při vypracování této bakalářské práce.

Abstrakt

V této bakalářské práci se řeší kompenzace jalové energie v sítích nízkého a vysokého napětí. V teoretické části je popsán rozbor průmyslových, přenosových a distribučních sítí. Dále jsou zde vysvětleny základní informace, týkající se kompenzace jalové energie. Jsou tady zmíněny jednotlivé elektrické výkony a také popsány příčiny nízkého účinníku v elektrické síti. V této práci je dále vysvětlen princip kompenzace a jeho hlavní výhody. Tato část obsahuje také popis možných způsobů připojení kompenzačních zařízení do elektrické sítě. Dále jsou zde zmíněny jednotlivé kompenzační zařízení a také různé druhy řízení kompenzačního výkonu. Praktická část se zabývá vlastním praktickým návrhem kompenzace pro smyšlenou průmyslovou síť.

Klíčová slova

Kompenzace, účinník, jalový výkon, kompenzační zařízení, průmyslová síť, distribuční síť, kompenzační kondenzátory, paralelní kompenzace.

Abstract

In this bachelor thesis is solved compensation of reactive energy in low and high voltage networks. In the theoretical part is described the analysis of industrial, transmission and distribution networks. Further are explained the basic information relating to compensation of the reactive energy. There are mentioned here the individual electrical powers and also described the reasons for the low power factor in the power network. In this work is further explained the principle of compensation and his main advantages. This part also contains a description of possible ways of connecting the compensation devices to the power network. Further are mentioned here individual the compensation devices and also different kinds of compensation power control. The practical part deals with own a practical proposal of compensation for a fictional industrial network.

Key words

Compensation, power factor, reactive power, compensation device, industrial network, distribution network, compensation capacitors, parallel compensation.

Obsah

Obsah.....	7
Seznam použitých symbolů a zkratk.....	10
Úvod.....	13
1 Členění elektrických sítí.....	14
1.1 Dělení elektrických sítí podle jmenovitého napětí.....	14
1.1.1 Hladiny napětí	14
1.2 Dělení elektrických sítí podle parametrů vedení	14
1.2.1 Činný odpor vedení	15
1.2.2 Indukčnost vedení	15
1.2.3 Kapacita vedení.....	16
1.2.4 Svodová vodivost	16
1.3 Dělení elektrických sítí podle typu sítě.....	16
1.3.1 Přenosová síť	16
1.3.2 Distribuční síť.....	17
1.3.3 Průmyslová síť	17
1.3.3.1 Druhy průmyslových sítí	18
2 Základy kompenzace jalového výkonu	20
2.1 Činný výkon.....	20
2.2 Jalový výkon	20
2.3 Zdánlivý výkon	21
2.4 Účinník.....	21
2.4.1 Příčiny nízkého účinníku.....	22
2.5 Princip kompenzace	22
2.6 Paralelní kompenzace	24
2.7 Souhrn vlivů kompenzace na spotřebiče a síť	26
3 Způsoby a prostředky pro kompenzaci jalového výkonu	27
3.1 Možnosti zapojení kompenzace	27
3.1.1 Individuální kompenzace	27
3.1.2 Skupinová kompenzace	28
3.1.3 Centrální kompenzace	28

3.1.4	Kombinovaná kompenzace	29
3.2	Prostředky pro kompenzaci jalového výkonu.....	29
3.2.1	Rotační kompenzátory.....	29
3.2.2	Statické kompenzátory	30
3.2.2.1	Statické kondenzátory.....	30
3.2.2.2	Chráněné kompenzační sekce	32
3.2.2.3	Filtry pro kompenzaci.....	33
4	Druhy řízení kompenzačního výkonu	34
4.1	Stupňovité řízené kompenzační zařízení	34
4.1.1	Kontaktní kompenzační zařízení.....	34
4.1.2	Bezkontaktní kompenzační zařízení.....	34
4.2	Plynule řízené kompenzační prostředky	35
4.2.1	Pasivní (s dekompenzačními prvky)	35
4.2.2	Aktivní.....	36
4.2.2.1	Paralelní aktivní filtr	37
4.2.2.2	Sériový aktivní filtr.....	37
4.2.2.3	Kombinovaný aktivní filtr	38
4.3	Kombinované kompenzační prostředky	38
5	Praktický návrh kompenzace.....	39
5.1	Zadání	39
5.2	Návrh nové kompenzace pro napětovou hladinu 0,4 kV	40
5.2.1	Určení kompenzačních stupňů	40
5.2.2	Volba kondenzátorů pro jednotlivé stupně.....	42
5.2.2.1	Určení kondenzátorů pro stupeň s hodnotou 17,8 kvar.....	42
5.2.2.2	Určení kondenzátorů pro stupeň s hodnotou 20 a 25 kvar.....	43
5.2.3	Volba tlumivek pro jednotlivé stupně	44
5.2.3.1	Určení tlumivek pro stupeň s výkonem 17,8 kvar	44
5.2.3.2	Určení tlumivek pro stupeň s výkonem 20 a 25 kvar.....	44
5.2.4	Výběr stykačů pro jednotlivé kompenzační stupně.....	45
5.2.5	Volba pojistek a pojistkových odpínačů pro jednotlivé kompenzační stupně.....	46
5.2.6	Volba regulátoru jalového výkonu	47
5.3	Návrh nové kompenzace pro napětovou hladinu 6 kV	48
5.3.1	Určení potřebného kompenzačního výkonu pro jeden asynchronní motor	48

5.3.2	Volba kompenzačních kondenzátorů VN.....	49
5.3.3	Volba hradicích tlumivek VN	50
5.3.4	Volba pojistek VN.....	51
Závěr.....		52
Použitá literatura		54
Seznam obrázků		57
Seznam tabulek.....		58

Seznam použitých symbolů a zkratek

Symbol	Jednotka	Význam symbolu
a	mm	Vzdálenost mezi vodiči
C	F	Kapacita
C_Y	F	Kapacita kondenzátorů při zapojení do hvězdy
C_D	F	Kapacita kondenzátorů při zapojení do trojúhelníku
$\cos\varphi$	-	Účinník
$\cos\varphi_K$	-	Účinník po kompenzaci
d_s	m	Střední vzdálenost vodičů
D_s	m	Střední vzdálenost vodičů od zrcadlových obrazů
f	Hz	Frekvence
f_N	Hz	Jmenovitá frekvence
f_r	Hz	Rezonanční frekvence
G	S	Svodová vodivost
HDO	-	Hromadné dálkové ovládaní
I	A	Elektrický proud
I_a	A	Statorový proud
I_c	A	Proud kondenzátoru
I_{ξ}	A	Činný proud
I_j	A	Jalový proud
I_{jind}	A	Induktivní jalový proud
I_{jkap}	A	Kapacitní jalový proud
I_{jK}	A	Jalový proud po kompenzaci
I_K	A	Kompenzační proud
I_L	A	Proud tlumivky
I_{LC}	A	Proud kompenzačního článku
Im	-	Imaginární osa
I_N	A	Jmenovitý proud
l	m	Délka vodiče
k_s	-	Činitel zvětšení rezistence
K	-	Koeficient kompenzace
K_B	-	Kondenzátorová baterie
K_P	-	Stupeň kompenzace
L	H	Indukčnost
L_1	-	1. fáze
L_2	-	2. fáze
L_3	-	3. fáze

m	m	Střední výška vodičů nad zemí
M	H	Vzájemná indukčnost
MN	-	Malé napětí
n	-	Řád harmonické
n_r	-	Řád harmonické při rezonanci
N	-	Počet stupňů
NN	-	Nízké napětí
p	-	Činitel zatlumení
P	W	Činný výkon
P_p	W	Výpočtové zatížení
P_z	W	Ztráty kondenzátoru při harmonickém průběhu
P_s	W	Ztráty kondenzátoru při neharmonickém průběhu
P_{ztr}	W	Ztrátový výkon
Q	var	Jalový výkon
Q_C	var	Kapacitní jalový výkon
Q_{C1}	var	Kapacitní jalový výkon stupně
Q_N	var	Jmenovitý jalový výkon
Q_L	var	Induktivní jalový výkon
Q_{LC}	var	Jalový výkon kompenzačního článku
Q_K	var	Kompenzační jalový výkon
Q_v	$C \cdot m^{-1}$	Elektrický náboj vodiče
r	mm	Poloměr vodiče
R	Ω	Činný odpor
R_e	-	Reálná osa
R_{SS}	Ω	Stejnoseměrný odpor
R_{STR}	Ω	Střídavý odpor
R_θ	Ω	Činný odpor při teplotě θ
R_{20}	Ω	Činný odpor při teplotě 20 °C
S	VA	Zdánlivý výkon
S_k	VA	Zdánlivý výkon po kompenzaci
S_v	mm^2	Průřez vodiče
t	s	Čas
$tg\delta$	-	Tangenta ztrátového úhlu
T	-	Transformátor
U	V	Elektrické napětí
U_C	V	Napětí na kondenzátoru
U_{CN}	V	Jmenovité napětí s hodnotou 440 V
U_f	V	Fázové napětí

U_N	V	Jmenovité napětí
U_S	V	Sdružené napětí
UVN	-	Ultra vysoké napětí
U_1	V	Vstupní napětí
U_2	V	Výstupní napětí
V	-	Vypínač
VN	-	Vysoké napětí
VVN	-	Velmi vysoké napětí
W	-	Přípojnice
X_L	Ω	Induktivní reaktance
X_{LN}	Ω	Fázová reaktance tlumivek
X_{LC}	Ω	Reaktance kompenzačního článku
X_C	Ω	Kapacitní reaktance
X_{CN}	Ω	Fázová reaktance kondenzátorů
Y	S	Příčná admitance
Z	Ω	Podélná impedance
ZVN	-	Zvlášť vysoké napětí
α	K^{-1}	Teplotní součinitel odporu
α_z	$^\circ$	Úhel zpoždění
β	-	Součinitel náročnosti
ε	$F \cdot m^{-1}$	Permitivita
ρ	$\Omega \cdot mm^2 \cdot m^{-1}$	Měrný odpor vodiče
ρ_v	m	Vzdálenost od vodiče
ρ_0	m	Vzdálenost od vodiče při nulovém potenciálu
ω	s^{-1}	Úhlová frekvence
ω_r	s^{-1}	Rezonanční kmitočet
ΔP	W	Činné ztráty
ΔP_K	W	Činné ztráty po kompenzaci
ΔP_s	W	Svodové ztráty
$\Delta P_{uše}$	W	Ztráty ušetřené
$\Delta \vartheta$	K	Teplotní rozdíl

Úvod

Tato bakalářská práce je rozdělena do pěti hlavních částí. První kapitola se zabývá rozdělením elektrických sítí. Je zde nejprve uvedeno dělení dle jmenovitého napětí, ve kterém jsou popisovány jednotlivé hladiny napětí. Dále je tady dělení podle parametrů vedení, kde jsou vysvětleny, jak základní elektrické veličiny vedení, tak sítě s prostorově soustředěnými nebo rozloženými parametry. Jako poslední je v této kapitole členění dle typu sítě, ve kterém jsou sítě rozděleny na přenosovou soustavu, distribuční soustavu a průmyslové sítě.

Druhá část se věnuje základním pojmům, které se týkají kompenzace jalového výkonu. V této části je hlavně vysvětleno, co to je jalový výkon a proč je pro kompenzaci tak důležitý. Dále je tady zmíněný účinník, jenž se definuje jako podíl činného výkonu P a zdánlivého výkonu S . Poté je tu vysvětlena samotná funkce kompenzace a také je zde popsán princip paralelního připojení kondenzátoru ke spotřebiči. Na závěr jsou shrnuty vlivy kompenzace a jeho výhody.

Další kapitola bakalářské práce popisuje možné způsoby zapojení kompenzačních zařízení do sítě. Je zde vysvětlena individuální, centrální, skupinová a také kombinovaná kompenzace. U každého způsobu kompenzace jsou popsány výhody a nevýhody jednotlivých zapojení. Dále se tato část zabývá kompenzačními prostředky, které slouží pro kompenzaci jalového výkonu. Jsou zde hlavně uvedeny rotační a statické kompenzátory. Statické kompenzační prostředky jsou pak dále rozděleny na statické kondenzátory, chráněné kompenzační sekce a kompenzační filtry.

Čtvrtá část popisuje jednotlivé druhy regulací kompenzačního výkonu. Je zde vysvětleno stupňovité řízení kompenzátorů, které se dále dělí na kontaktní a bezkontaktní kompenzační zařízení. Dále je tady popsáno plynule řízení kompenzačních prostředků, jenž se dále člení na pasivní a aktivní regulaci. Pasivní řízení používá dekompenzační prvky a aktivní řízení užívá aktivní filtry.

Poslední kapitola bakalářské práce se zabývá vlastním praktickým návrhem kompenzace pro smyšlenou průmyslovou síť, která je z hodnoty napětí 22 kV transformována na napětí 0,4 kV a 6 kV. Cílem tohoto praktického návrhu je stanovit novou kompenzaci v obou uvedených napěťových hladinách 0,4 kV a 6 kV na hodnotu účinníku $\cos\varphi = 0,97$. Je zde navrhována skupinová kompenzace pro napěťovou hladinu 0,4 kV a individuální kompenzace pro hladinu napětí 6 kV.

1 Členění elektrických sítí

Aby se přenesla elektrická energie z elektrárny až do místa, kde se spotřebuje, tak je nutné mít elektrizační soustavu, která se skládá z elektrických stanic, zdrojů a elektrických sítí. Elektrická síť je souhrn galvanických spojených částí, které mají stejné napětí. Pro rozvod a přenos elektrické energie se v elektrické síti používá střídavé napětí. [3]

1.1 Dělení elektrických sítí podle jmenovitého napětí

K přenosu elektrické energie se používají na území České republiky dvě soustavy. Jedná se o přenosovou soustavu a distribuční soustavu. V České republice se využívá pět hladin napětí, jedná se o hladinu malého napětí, nízkého napětí, vysokého napětí, velmi vysokého napětí a zvlášť vysokého napětí. Jediná hladina, která se v České republice nepoužívá, je hladina ultra vysokého napětí.

1.1.1 Hladiny napětí

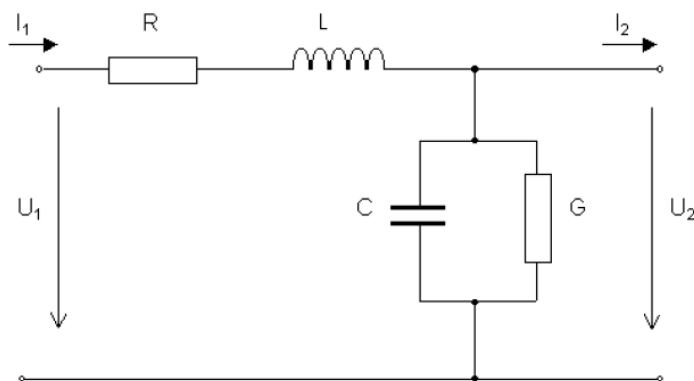
- Hladina malého napětí (MN) - používá se do 50 V.
- Hladina nízkého napětí (NN) - od 50 V do 1000 V.
- Hladina vysokého napětí (VN) – hladina napětí od 1000 V až do 52 kV.
- Hladina velmi vysokého napětí (VVN) - od 52 kV až do 300 kV.
- Hladina zvlášť vysokého napětí (ZVN) – napětí od 300 kV do 800 kV.
- Hladina ultra vysokého napětí (UVN) – tato hladina se používá nad 800 kV. [9]

1.2 Dělení elektrických sítí podle parametrů vedení

Základní elektrické parametry vedení jsou indukčnost L , činný odpor R , kapacita C a svodová vodivost G , která se často zanedbává. Tyto parametry se volí podle délky vedení. Síť se dělí na síť s prostorově soustředěnými parametry a síť s prostorově rozloženými parametry. [2] [5]

Síť s prostorově soustředěnými parametry se používá u hladiny nízkého a vysokého napětí. Takže se jedná o vedení, které není moc dlouhé a při střídavém napětí se tam respektuje indukčnost L a činný odpor R . [5]

Síť s prostorově rozloženými parametry se používá u hladiny velmi vysokého napětí. Takže se jedná o vedení, které jsou značně dlouhé a u kterých se respektuje indukčnost L , činný odpor R a kapacita C . Jestliže se bude jednat o elektrické sítě, které budou mít minimálně jmenovité napětí 400 kV, tak se tam bude respektovat ještě parametr svodová vodivost G . [5]



Obrázek 1: Schéma vedení obsahující uvedené elektrické parametry. [5]

Podélná impedance vedení se skládá z indukčnosti L a činného odporu R a jeho vzorec je:

$$\bar{Z} = R + j\omega L \quad [\Omega] \quad (1.1)$$

Příčná admitance vedení se skládá z kapacity C a svodové vodivosti G a pro jeho vztah platí:

$$\bar{Y} = G + j\omega C \quad [S] \quad (1.2)$$

1.2.1 Činný odpor vedení

Tento parametr se mění podle toho, jaký vodivý materiál se na vedení použije. Lze ho definovat pomocí vzorce: [5]

$$R = \rho \cdot \frac{l}{S_v} \quad [\Omega] \quad (1.3)$$

Tento vzorec říká, že činný odpor vedení je větší, čím větší bude měrný odpor vedení a délka vedení. Zatímco činný odpor vedení bude menší, čím větší bude průřez vedení. [5]

Další vlastnost činného odporu je závislost na teplotě, kde činný odpor vedení je přímo úměrný teplotě vodiče. Tady tuto vlastnost bere v úvahu teplotní součinitel odporu α . [5]

Pro činný odpor vedení při jakékoliv teplotě platí vztah:

$$R_\theta = R_{20} \cdot (1 + \alpha \cdot \Delta\theta) \quad [\Omega] \quad (1.4)$$

Dále je činný odpor vedení závislý také na frekvenci, této závislosti se říká skinefekt neboli povrchový jev. Jedná se o jev, kdy vlivem nepravidelného rozložení střídavého proudu po povrchu vodiče se zvětší odpor. Takže to znamená, že odpor u střídavého proudu je větší než u stejnosměrného. Při frekvenci 50 Hz je toto zvětšení odporu tak minimální, že se většinou zanedbává. [2] [5]

$$R_{stř} = k_s \cdot R_{ss} \quad [\Omega] \quad (1.5)$$

1.2.2 Indukčnost vedení

Jakékoliv elektrické vedení má indukčnost. Je to z důvodu toho, že kolem vodiče vzniká elektromagnetické pole, které působí na vodič, ve kterém vzniklo a také na další vodiče nacházející se

v okolí. Existuje indukčnost vlastní L a vzájemná M . Vlastní indukčnost L znamená, že se ta indukčnost nachází ve vodiči, ve kterém vznikla a vzájemná indukčnost se vyskytuje mezi vodiči. [5]

Vzorec pro vlastní indukčnost L na kilometr je:

$$L = 0,46 \cdot \log \frac{2 \cdot l}{r} - 0,15 \quad [\text{mH/km}] \quad (1.6)$$

Vzorec pro vzájemnou indukčnost M na kilometr je určen tímto vztahem:

$$M = 0,46 \cdot \log \frac{2 \cdot l}{a} - 0,2 \quad [\text{mH/km}] \quad (1.7)$$

Vodiče o různých indukčnostech mohou způsobit, že by napětí na konci vedení nebylo symetrické. Aby se tohle nestalo, tak se u vedení s hladinou napětí VVN a ZVN vytváří zákrut. To znamená, že se v místě, kde se vytvoří zákrut, prohodí postavení vodičů v hlavě stožáru. Pomocí tohoto zákrutu bude v každém vodiči téměř shodná indukčnost. [5]

1.2.3 Kapacita vedení

Elektrické vedení má kapacitu proto, že vzniká kolem vodiče elektrické pole, které má vliv na vodič, ve kterém vzniklo, a také na další vodiče nacházející se v okolí. Z elektrického potenciálu se odvozuje kapacita vedení. [5]

Vzorec pro elektrický potenciál je následující:

$$U = \frac{Q_v}{2 \cdot \pi \cdot \varepsilon} \ln \frac{\rho_0}{\rho_v} \quad [\text{V}] \quad (1.8)$$

Pro střední kapacitu vodiče na kilometr platí vztah:

$$C_{STŘ} = \frac{0,0242}{\log \frac{d_s \cdot 2 \cdot m}{r \cdot D_s}} \quad [\mu\text{F/km}] \quad (1.9)$$

1.2.4 Svodová vodivost

Vodivost izolátorů zapříčiní svodovou vodivost G . Tenhle parametr je neprospěšný v tom, že zapříčiňuje činné ztráty v elektrické síti. Svodová vodivost G se změní podle toho, jak bude kvalitní izolátor a také jaké budou atmosférické podmínky. [5]

Pro svodové ztráty na kilometr platí vztah:

$$\Delta P_S = U_S^2 \cdot G_S \quad [\text{W/km}] \quad (1.10)$$

1.3 Dělení elektrických sítí podle typu sítě

1.3.1 Přenosová síť

Přenosová soustava je jedna z nejdůležitějších částí v elektrizační soustavě. Jedná se o navzájem propojený souhrn vedení a zařízení, které se používají pro napětíové hladiny 400 kV, 220 kV a některé zvolené vedení 110 kV. Buď jsou elektrárny připojeny rovnou do přenosových sítí o

napětíových hladinách 400 kV a 220 kV nebo se připojí do elektrické sítě o napětíové hladině 110 kV, která má zvyšovací transformátor, díky kterému může pracovat do přenosové soustavy. V přenosové soustavě se nacházejí uzly, které představují elektrické stanice. Tyto stanice slouží ke spínání větví soustavy a také se tam transformuje napětí na jiné napětí. Obvykle se jedná o napětí 110 kV, které pak slouží k napájení distribuční soustavy. Hlavní funkce přenosové soustavy je přenášet na větší vzdálenosti velké výkony po České republice a také spojit naši elektrizační soustavu s ostatními soustavami sousedních států díky hraničnímu vedení. Přenosová soustava České republiky má dohromady 17 hraničních vedení s okolními státy. [3] [4] [8]

Společnost ČEPS a.s. vlastní přenosovou soustavu České republiky. V současné době obsahuje přenosová soustava délku vedení 3735 km o napětíové hladině 400 kV, vedení 220 kV má délku 1909 km a pro elektrické vedení 110 kV se jedná o vzdálenost 84 km. Dvě hlavní napětíové úrovně 400 kV a 220 kV obsahují 75 transformátorů a 42 rozvoden. [7]

Přenosová soustava používá pro přenos elektrické energie na větší vzdálenosti vysokou hodnotu napětí. Je to z důvodu toho, že čím větší napětí bude na vedení, tak tím bude menší proud procházet vedením, což má za následek menší přenosové ztráty na vedení. Přenosová soustava České republiky používá největší hladinu napětí 400 kV. V jiných státech, jako je například Rusko, se používá i napětíová hladina 1000 kV. [6]

Přenosová síť České republiky je součástí systému kontinentální Evropy, kde jsou přenosové soustavy synchronně spojeny dohromady v jednu síť. Přenosové soustavy se mohou spojit s jinými přenosovými soustavami asynchronně nebo synchronně. Při synchronním spojení se vedení propojí přímo a používá se tam stejný kmitočet. U asynchronního spojení se použije stejnosměrné spojky k propojení soustav. Hlavní rozdíl je v tom, že tam není stejný okamžitý kmitočet. Jmenovitý kmitočet u asynchronního spojení může být shodný, ale vždy tam bude odlišný okamžitý kmitočet. [8]

1.3.2 Distribuční síť

Distribuční síť je součástí elektrizační soustavy a navazuje na přenosovou soustavu. Jedná se o navzájem spojený souhrn vedení a zařízení, které se používají k přenosu elektrické energie až ke spotřebitelům. V distribuční soustavě se používají napětíové hladiny 110 kV, ale nepoužívají se všechny, protože některé vedení 110 kV jsou součástí přenosové soustavy. Dále do ní patří všechny vedení, které jsou nižší než vedení o napětíové hladině 110 kV. Jedná se hlavně o síť 35 kV, 22 kV, 10 kV, 6 kV a 0,4 kV. Distribuční síť se používá pro přenos elektrické energie na menší vzdálenosti. Distribuční soustavu vlastní tři společnosti. Jedná se o PRE distribuce, a.s., ČEZ Distribuce, a.s. a E.ON Distribuce, a.s. [4] [8]

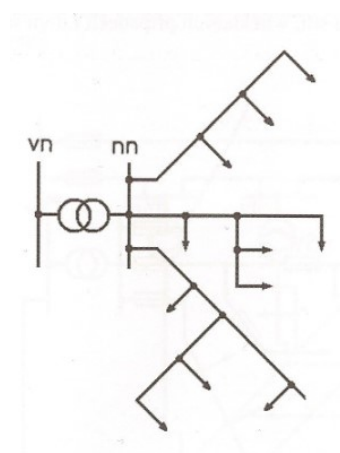
1.3.3 Průmyslová síť

V průmyslovém rozvodu se staví transformovny tak, aby byly co nejbližší místu s nejvyšším odběrem elektrické energie. Dále se přivádí napětí o hladině VN co nejbližší k spotřebičům. Jestliže se jedná o malé firmy, tak tam stačí jediná transformovna VN/NN. Pro obrovské závody musí být kromě vstupní transformovny, také několik hlavních rozvoden, které se nachází v místě s největší spotřebou elektriny a pak i podružné transformovny, které se budují poblíž spotřebičů. [3]

1.3.3.1 Druhy průmyslových sítí

- Paprsková síť

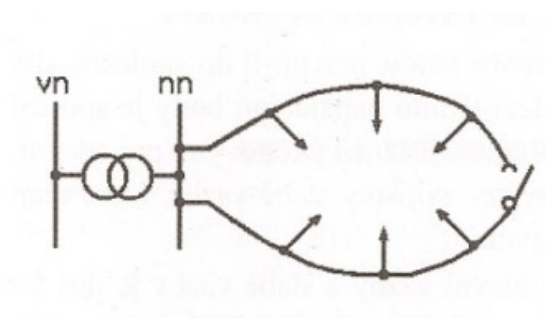
Na obrázku č. 2 lze vidět paprskovou síť nízkého napětí. Z paprskové sítě je z transformovny přivedeno vedení, které slouží k napájení odběrů elektrické energie. Kterýkoliv paprsek v paprskové síti je samostatný, takže se nedají mezi sebou propojit. Výhoda paprskové sítě je v tom, že se jedná o velmi levný způsob rozvodu. Nevýhoda této sítě je malá spolehlivost. [3] [4]



Obrázek 2: Paprskový rozvod NN. [3]

- Okružní síť

Na obrázku č. 3 je znázorněna okružní síť nízkého napětí. Okružní rozvod se provozuje v sepnutém nebo rozepnutém stavu. Většinou se používají jako rozepnuté neboli jako paprskové. V okružní síti se polosmyčky vedou takovým způsobem, že je lze pak sepnout v spínacích trafostanicích. Výhoda tohoto rozvodu je v tom, že když se stane porucha na vedení, tak lze připojit poškozený obvod na vedlejší vývod. Tohle přepnutí se může udělat buď samočinně nebo ručně. Když se to porovná s paprskovou sítí, tak je okružní síť dražší, protože je tam nutný větší úsek vedení pro vzájemné propojení. Okružní síť se využívá pro hladiny nízkého napětí, vysokého napětí a velmi vysokého napětí. [3] [4]

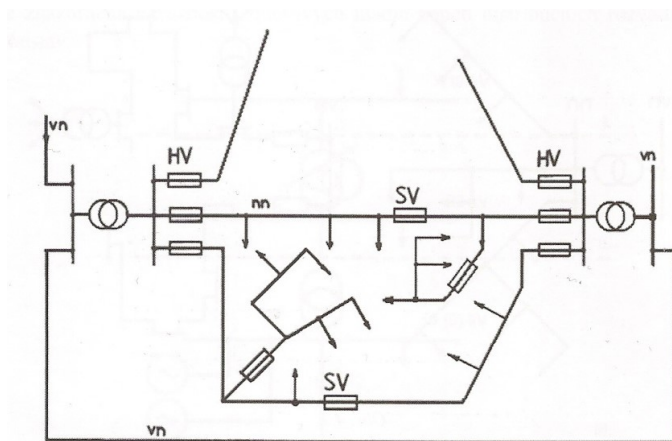


Obrázek 3: Okružní rozvod NN. [3]

- Zjednodušená mřížová síť

V podstatě se jedná o sepnutý okružní rozvod. V tomto rozvodu se navrhuje jištění takovým způsobem, že když se poškodí určitá část vedení, tak se tento úsek rozvodu selektivně odpojí díky

pojistkám a zbylá síť přetrvává v provozu. Na obrázku č. 4 lze vidět zjednodušený mřížový rozvod. Tento rozvod se vytvoří pomocí minimálně dvou transformátorů, které budou pracovat do jednotné sítě. Tyto transformátory jsou propojeny hlavním vedením, které se liší větším průřezem od ostatních vedení a také jsou jistiány hlavními pojistkami. V určitých místech hlavního vedení se zapojují pojistky, které se nazývají pojistky slabé vazby. Tyto pojistky slouží pro odpojení části vedení, když tam vznikne například zkrat, ještě před pojistkami hlavními. Doporučuje se použít poměr jmenovitého proudu hlavních pojistek ku pojistkám slabé vazby 2:1. [3] [4]



Obrázek 4: Zjednodušený mřížový rozvod. [3]

2 Základy kompenzace jalového výkonu

2.1 Činný výkon

Elektrický výkon je všeobecně součinem elektrického napětí a elektrického proudu, který ze sítě odebírá elektrický spotřebič. V elektrickém spotřebiči se tento odebraný výkon přemění na činný výkon P . Jedná se o výkon, který koná určitou práci a nazývá se také užitečný výkon. [11]

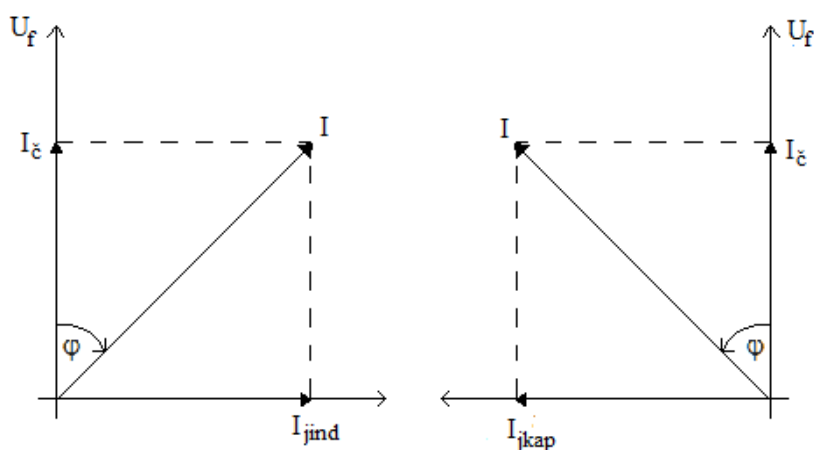
Pro jednofázovou soustavu se vypočte činný výkon z rovnice:

$$P = S \cdot \cos \varphi = U_f \cdot I \cdot \cos \varphi = U_f \cdot I_{\xi} \quad [\text{W}] \quad (2.1)$$

Při pohledu na rovnici 2.1 je patrné, že účinník $\cos \varphi$ a činný výkon P jsou v přímé úměře a že maximální velikost činného výkonu P se získá pro $\cos \varphi = 1$, což znamená pro $\varphi = 0$. Z toho vyplývá, že bude nulová jalová složka proudu či výkonu. Jestliže bude účinník $\cos \varphi$ klesat, tak budou v síti větší ztráty. [3]

2.2 Jalový výkon

Spotřebiče typu kapacitního a induktivního charakteru potřebují pro svou funkci nejen činný výkon P , ale také výkon jalový Q . U ideálního kapacitního charakteru jalového výkonu proud předbíhá napětí o $\pi/2$ a u ideálního induktivního charakteru jalového výkonu je proud opožděn za napětím o $\pi/2$. Spotřebiče induktivního charakteru jsou v průmyslu ve větší míře, jako například asynchronní motory, transformátory a podobně. Vyžadují pro svůj provoz v síti existenci jalového výkonu Q , jenž je nezbytný pro vznik magnetického pole, který je pak navrácen opět do sítě. Jalový výkon Q nekoná práci a putuje mezi zdrojem a spotřebičem a naopak, takže jej nelze nijak zužít. Tím jak cestuje, tak nesmyslně zatěžuje generátory, transformátory a přenosovou nebo distribuční síť. Což má za následek vznik ztrát, které jsou ve tvaru tepla uvolňovány do prostředí. Proto je nutné tento nežádoucí výkon vykompenzovat. [1] [5] [11]



Obrázek 5: Fázorový diagram proudu a napětí u kapacitních a induktivních spotřebičů.

Pro jednofázovou soustavu se vypočte jalový výkon z rovnice:

$$Q = S \cdot \sin\varphi = U_f \cdot I \cdot \sin\varphi = U_f \cdot I_j \quad [\text{var}] \quad (2.2)$$

Na obrázku č. 5 lze vidět, že jalový proud induktivních spotřebičů je v protifázi s jalovým proudem kapacitních spotřebičů. Z tohoto důvodu plyne, že vznikne taková situace, kdy by byla minimální nebo i dokonce nulová jalová složka proudu. Musely by se, ale přijatelně seřadit kapacitní a induktivní spotřebiče. Takle znalost se hodí při kompenzaci jalového výkonu. [3]

2.3 Zdánlivý výkon

Jedná se o celkový přenášený výkon, který obsahuje složku jalového výkonu a činného výkonu. Čili jedná se o vektorový součet činného a jalového výkonu. [11]

Pro jednofázovou soustavu se vypočte zdánlivý výkon z rovnice:

$$S = U_f \cdot I \quad [\text{VA}] \quad (2.3)$$

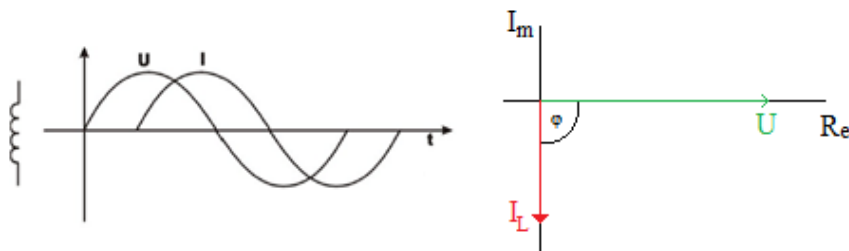
2.4 Účinník

Jedná se o významný parametr. Účinník se označuje $\cos \varphi$ a kde φ je úhel, který se nachází mezi fázorem napětí a proudu. Je definován jako podíl činného výkonu P a zdánlivého výkonu S . [5] [13]

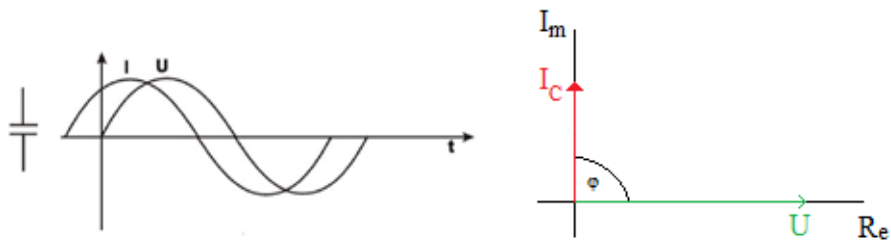
Z hlediska výkonu platí pro účinník vztah:

$$\cos\varphi = \frac{P}{S} \quad [-] \quad (2.4)$$

Účinník říká, jak velké množství zdánlivého výkonu S lze změnit na užitečnou energii. Jde o bezrozměrnou veličinu. Hodnota účinníku se pohybuje v rozmezí od 0 do 1. Pokud účinník bude roven jedné, tak fázový posuv bude nulový a výkon bude jen činný (čistě ohmický). Vzniká ideální situace, kdy veškerá energie bude jako činný výkon. Jestliže bude účinník nulový, tak fázový posuv bude $\pm 90^\circ$ a výkon bude jalový (čistě indukční nebo čistě kapacitní). Dochází k nejhorší situaci, kdy veškerá energie je jalová, která nedělá žádnou práci a místo toho zatěžuje síť. Takže čím bude účinník menší, tak tím budou ztráty větší. Obrázky č. 6 a 7 znázorňují průběhy a fázorové diagramy napětí a proudu u ideálního kapacitního a induktivního spotřebiče. U těchto spotřebičů je napětí fázově posunuto proti proudu. Z obrázku č. 6 a 7 vyplývá, že čím větší hodnota bude φ , tak tím bude nižší hodnota $\cos \varphi$ a tím poroste hodnota jalového výkonu Q . Zmenšením jalového výkonu Q , lze zvýšit účinník $\cos \varphi$. Tohle snížení je možné provést pomocí kompenzačních prostředků. [13] [14]



Obrázek 6: Posuv napětí a proudu induktivního spotřebiče.



Obrázek 7: Posuv napětí a proudu kapacitního spotřebiče.

2.4.1 Příčiny nízkého účinníku

Důsledky nízkého účinníku lze rozdělit do těchto bodů:

- Úbytek napětí se zvýší v elektrické síti.
- Využití dosavadních elektrických zařízení, které se používají v rozvodně, bude nižší. Tohle má za následek, že přenášený činný výkon P bude nižší.
- Odběratele elektrické energie dostanou finanční přírážku k ceně spotřebované elektrické energie od dodavatele, jestliže používají špatný účinník.
- Pořizovací cena elektrických přístrojů, jako jsou vypínače, měřicí a jistící přístroje, transformátory apod., se zvýší z důvodu toho, že se elektrické přístroje dimenzují na zdánlivý výkon S .
- Vlivem nízkého účinníku se zvýší ztráty v elektrické síti, protože ztrátový výkon P_{ztr} je přímo úměrný na hodnotě druhé mocniny jalového výkonu Q . [3]

2.5 Princip kompenzace

Kompenzaci účinníku musí všichni odběratelé vykonat, jinak by byli postiženi doplatkem k ceně elektrické energie od dodavatele. Hlavní důvod kompenzace je tedy snížit jalovou složku proudu a tím zmenšit ztráty pro co nejrozsáhlejší úsek energetických sítí. Takže princip kompenzace spočívá v tom, aby spotřebič elektrické energie neodebíral z převážné části elektrické sítě jalový výkon Q , čímž by tu síť nepotřebně nezatěžoval. Aby tedy spotřebič neodebíral jalový výkon Q ze sítě, tak je důležité mít zdroj jalového výkonu jako například cívka nebo kondenzátor, který se ke spotřebiči zapojí co nejbližší, protože část úseku vedení za kompenzátozem již není vykompenzována. Protože se jalový výkon Q dodává přímo u spotřebiče, síť bude méně zatížená a také budou menší činné ztráty. [5] [15]

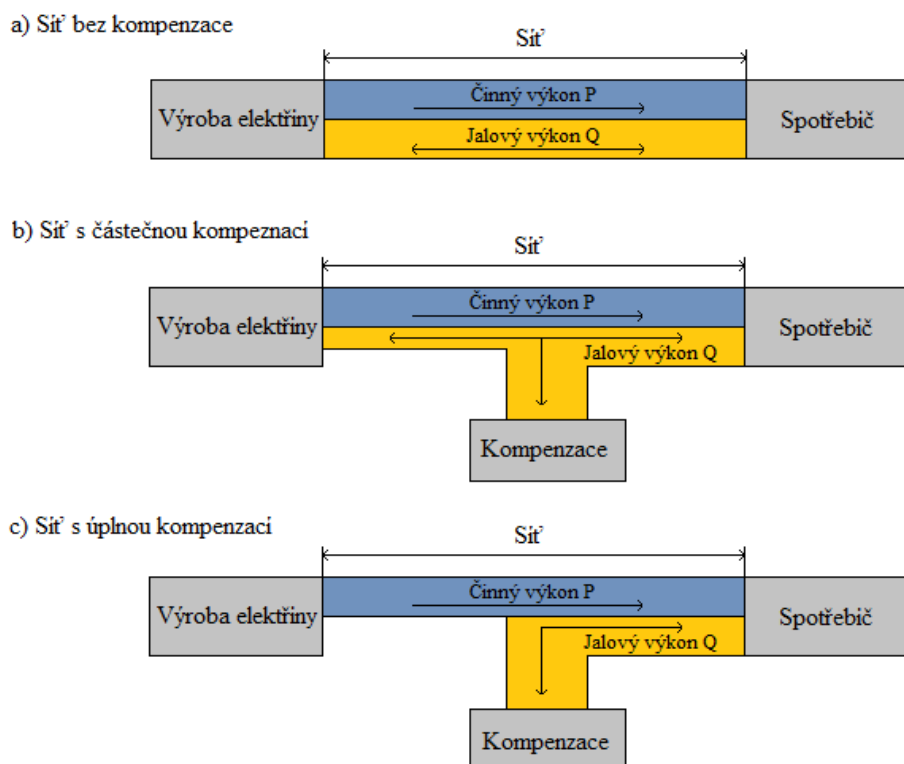
Odlišné typy spotřebičů elektrické energie v elektrických sítích mají různé charaktery. První skupina spotřebičů má čistě činný charakter jako například vařiče, žárovky apod. Dále jsou elektrické spotřebiče, které požadují pro svoji činnost elektrické pole. U této skupiny spotřebičů proud předbíhá napětí o $\pi/2$ a tenhle druh spotřebičů se vyznačuje charakterem kapacitním. Tuto specifikaci mají například dlouhé elektrické vedení nebo kondenzátory. Dále existují elektrické spotřebiče, které vyžadují pro svoji funkci vytvoření magnetického pole, kde kromě činné složky je nutná i jalová složka proudu. Jde o spotřebiče, kde napětí předbíhá proud o $\pi/2$ a ze sítě odebírá jalovou složku proudu induktivního charakteru. Příkladem jsou spotřebiče typu indukční motory, elektromotory a

transformátory. Často je v elektrických sítích větší počet spotřebičů induktivního charakteru, a proto je důležité těmto spotřebičům dodat opačný jalový výkon (kapacitní jalový výkon Q_C), aby se provedla kompenzace. [3] [5] [15]

U kompenzaci jalového výkonu mohou nastat tři situace, které jsou znázorněny na obrázku č. 8. První situací je síť bez kompenzace, kde jalový výkon Q pendluje mezi spotřebičem a zdrojem elektrické energie a naopak. V tomto případě je síť nejvíce zatěžována v porovnání s ostatními situacemi, protože se veškerým vedením přenáší celý potřebný jalový výkon Q , který vyžaduje spotřebič. Z čehož vyplývá, že síť bude mít největší ztráty a také tu bude největší šance na vznik poruch vlivem velkého proudového zatížení. [11] [14]

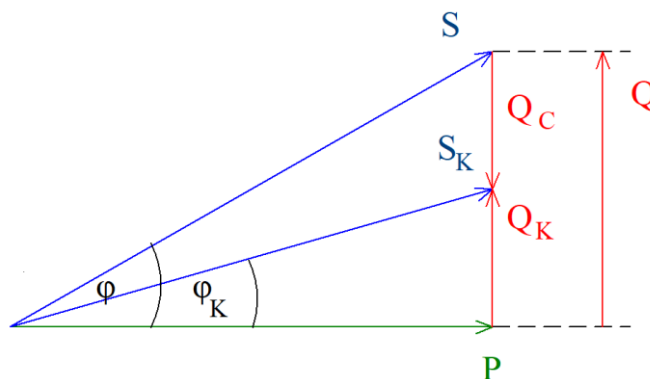
Další případ je situace s částečnou kompenzací, kde je již zapojen kompenzátor, který do spotřebiče dodává velké množství potřebného jalového výkonu Q . Ze sítě je stále odebíraný jalový výkon Q , ale vytváří se ho menší množství, což znamená, že převážná část sítě bude méně zatížená v porovnání s první situací. [14]

Poslední situací je úplná kompenzace, kde ze sítě není žádný jalový výkon odebírán a celkový potřebný jalový výkon Q dodává do spotřebiče kompenzátor. V praxi se takhle poslední situace neobjevuje, protože by to znamenalo, že účinník je $\cos \varphi = 1$ a mohlo by nastat překompenzování. Obvykle se v praxi kompenzuje účinník na $\cos \varphi = 0,97$, z čehož vyplývá, že ze sítě je odebíraný jalový výkon Q , ale jde o minimální množství, takže převážná část sítě je nejméně zatěžována v porovnání s předchozími případy. [14]



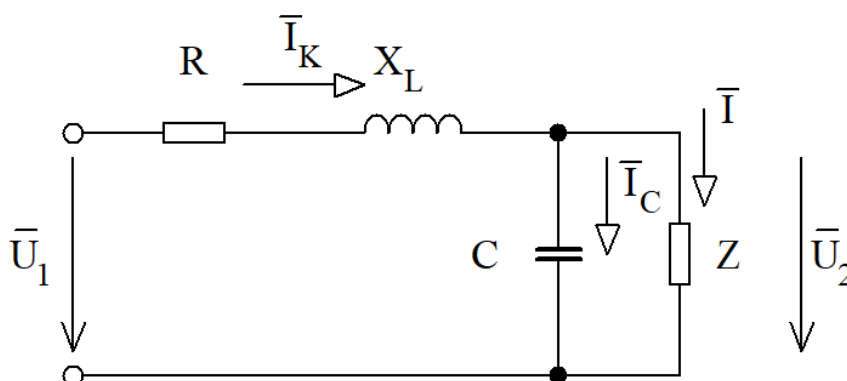
Obrázek 8: Síť bez kompenzace, s částečnou kompenzací a s úplnou kompenzací jalového výkonu.

Na obrázku č. 9 je nakreslen Fázorový diagram výkonů před a po kompenzaci. Lze vidět, že jalový výkon po kompenzaci Q_K je nižší než jalový výkon před kompenzací Q . Dále se pomocí kompenzace sníží i výsledný zdánlivý výkon S_K na rozdíl od výsledného zdánlivého výkonu S bez kompenzace. Jediný parametr, který se díky kompenzaci nemění, je činný výkon P . Úhel φ je bez kompenzace větší, což by znamenalo, že účinník $\cos \varphi$ by byl nízký a tím by se projevy i vyšší ztráty v síti. Pomocí kompenzace se úhel φ zmenší a zároveň se zvětší účinník $\cos \varphi$. [14]



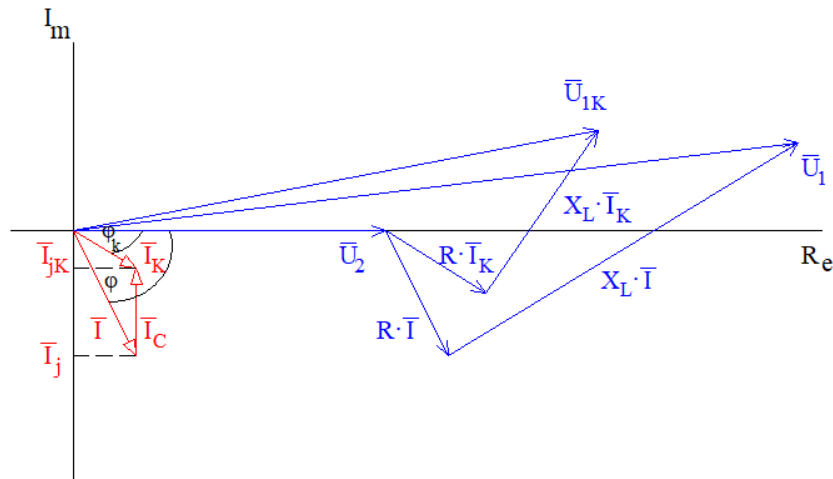
Obrázek 9: Fázorový diagram výkonů před a po kompenzaci.

2.6 Paralelní kompenzace



Obrázek 10: Schéma paralelní kompenzace.

Na obrázku č. 10 je znázorněn obvod s paralelním kondenzátorem, který je zapojen paralelně se spotřebičem. Princip paralelní kompenzace je znázorněn na obrázku č. 11. V momentě, kdy ještě není použita kompenzace, prochází vedením a spotřebičem proud I . Díky proudu I vzniknou na vedení úbytky napětí $R \cdot I$ a $X_L \cdot I$. Když se připojí paralelně ke spotřebiči kondenzátor, tak se proud kondenzátoru I_C a proud spotřebiče I vektorově sečtou. Pak vedením bude procházet proud I_K , který bude na vedení vytvářet úbytky napětí $R \cdot I_K$ a $X_L \cdot I_K$, což má za následek zmenšení úbytku napětí. Dále se zmenší ztráty v síti a zvětší se průchodnost vedení. Je to z důvodu, že absolutní velikost proudu I je větší než absolutní velikost proudu I_K . [5]



Obrázek 11: Fázorový diagram paralelní kompenzace.

Během kompenzace je činná složka proudu konstantní, což ale neplatí pro jalovou složku proudu, která se změní z I_j na I_{jK} a to samé platí pro fázový úhel, který se změní z hodnoty φ na hodnotu φ_K . [1] [5]

Pro koeficient kompenzace K platí vzorec:

$$K = \frac{I_{jK}}{I} = \frac{\tan \varphi_K}{\tan \varphi} \quad [-] \quad (2.5)$$

Pro stupeň kompenzace K_P platí vztah:

$$K_P = 1 - K = \frac{I_C}{I_j} = \frac{\tan \varphi - \tan \varphi_K}{\tan \varphi} \quad [-] \quad (2.6)$$

Kompenzační výkon kondenzátorů Q_C , který je potřebný pro kompenzaci, je dán pro jednu fázi:

$$Q_C = U_F \cdot I_C = U_F^2 \cdot \omega \cdot C = P_F \cdot (\tan \varphi - \tan \varphi_K) \quad [\text{var}] \quad (2.7)$$

Činné ztráty bez kompenzace jsou dány:

$$\Delta P = 3 \cdot R \cdot I^2 = \frac{R}{U_S^2} \cdot (P^2 + Q^2) \quad [\text{W}] \quad (2.8)$$

Činné ztráty s kompenzací jsou dány vztahem:

$$\Delta P_K = \frac{R}{U_S^2} \cdot (P^2 + (Q - Q_C)^2) \quad [\text{W}] \quad (2.9)$$

Pomocí kompenzace se zmenší činné ztráty v síti, čímž vznikne rozdíl činných ztrát před kompenzací a po kompenzaci neboli tzv. ztráty ušetřené. Vztah pro ušetřené ztráty je dán: [5]

$$\Delta P_{uše} = \frac{R}{U_S^2} \cdot Q_C \cdot (2 \cdot Q - Q_C) \quad [\text{W}] \quad (2.10)$$

Paralelní kompenzace je pro zmenšení ztrát na vedení velice důležitá a ekonomicky výhodná ve srovnání s jinými metodami jako je například zvýšením U_N nebo zvětšením průřezu vedení. [1]

2.7 Souhrn vlivů kompenzace na spotřebiče a síť

Existuje dost metod pro zmenšení ztrát jako například přechod na vyšší hladinu napětí, zvětšení průřezu vodičů nebo vhodné propojení sítě apod. Když se porovná kompenzace účinníku s ostatními způsoby, tak lze zjistit, že kompenzace účinníku je jedna z nejhospodárnějších a nejefektivnějších metod, jak snížit ztráty. [1]

Když se vhodně navrhne kompenzace, pak lze získat takovou velikost účinníku, že jalová složka proudů a výkonů nebude nesmyslně zatěžovat zdroje a vedení. Díky tomu se bude efektivněji přenášet činný výkon po vedení, což bude mít i důsledek na sazbu elektrické energie od rozvodného závodu, která může být snížena, protože účinník bude zachováván v žádaných mezích. [3]

Hlavní výhody kompenzace:

- Sníží se ztráty v elektrické síti.
- Zvýší se využití elektrických zařízení, které se používají v rozvodně.
- Činný výkon, který se přenáší po vedení, se zvýší.
- Je možné zmenšení sazby za odebranou elektrickou energii.
- Napěťové poměry v síti a symetrie zatížení v síti se zdokonalí. [3]

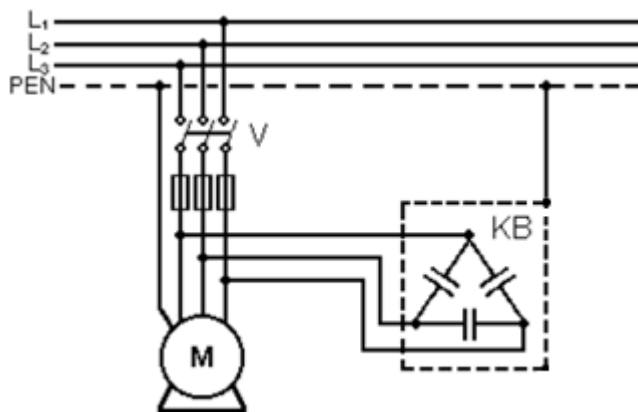
3 Způsoby a prostředky pro kompenzaci jalového výkonu

3.1 Možnosti zapojení kompenzace

Paralelní kompenzace je jedna z ekonomicky nejvýhodnějších možností pro redukci ztrát při distribuci elektrické energie. Při připojení paralelní kompenzace do sítě, lze různým vložením kompenzačních prostředků rozlišovat kompenzaci individuální (také nazývána jako jednotlivá), centrální, skupinovou a kombinovanou kompenzací. [1]

3.1.1 Individuální kompenzace

Kompenzuje se každý spotřebič samostatně. U individuální kompenzaci se používají jenom statické kompenzátory. Motor či induktivní spotřebič má na svorky ke svému jmenovitému výkonu zapojenou baterii kondenzátorů nebo kondenzátor. Při použití statických kondenzátorů nízkého napětí jako kompenzačního zařízení se můžou připojit například přímo na svorky motoru nebo na výstupní doteky pojistek. Statický kondenzátor u nízkého napětí nevyžaduje pojistky a ani vybíjecí odpory. Tyto kompenzační prostředky se k motoru připojují trvale. Když jde o motory napájené vysokým napětím, tak kondenzátor musí být vybaven vybíjecím zařízením a určitou ochranou jako jsou například pojistky. Vybíjecí zařízení u vysokého napětí je z důvodu toho, že když se odpojí trojfázový kondenzátor z napájecí sítě, tak na každé fázi kondenzátoru zůstane naindukováno napětí. Proto je tam připojeno vybíjecí zařízení (většinou odpor), přes který se tento kondenzátor vybije. Kondenzátor se vypíná a zapíná současně s motorem, což znamená že je kompenzace velice spolehlivá. Není třeba provádět údržbu vypínacích zařízení, neboť kondenzátor se od motoru neodpojuje. [3] [5]



Obrázek 12: Schéma zapojení při individuální kompenzaci. [5]

Výhoda individuální kompenzace je v redukci úbytku napětí a ztrát ve vedení, kdy úspory ztrát jsou největší ze všech možných druhů kompenzací. Dále se kompenzuje přímo v místě potřeby a všechny přívodní vedení až k motoru jsou odlehčeny od přenosu jalového výkonu. Odlehčení je ze všech možných způsobů kompenzací největší. [5]

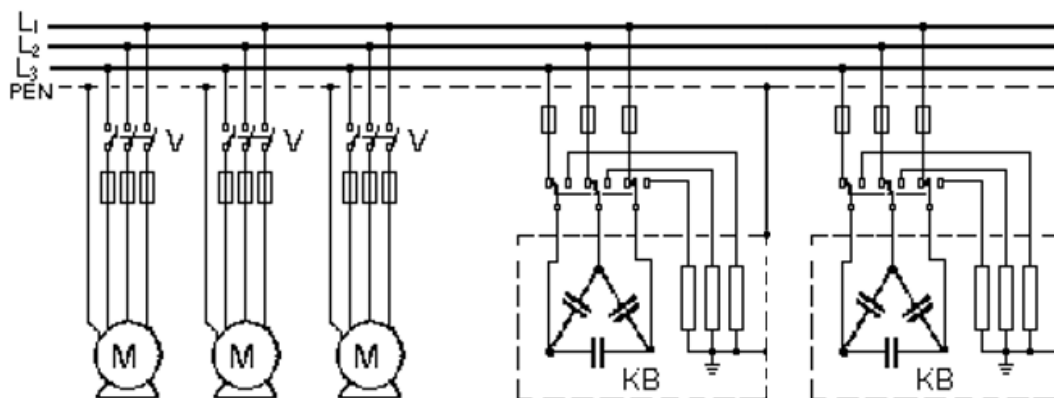
Nevýhoda této kompenzace je u strojů s nízkou dobou využití, kde kompenzační výkon kondenzátoru je velmi málo využíván. Další nevýhodou jsou složitější kontroly kompenzovaných prostředků, které bývají ve firmě rozptýlené po celé ploše. [5]

3.1.2 Skupinová kompenzace

Ve srovnání s individuální kompenzací se ve skupinové kompenzuje skupina několika spotřebičů. Většinou se tato kompenzace používá v dílně, kde se nachází několik motorů. Tato skupina spotřebičů má jednu společnou kondenzátorovou baterii, která se zapojí k přípojnícím skupinového rozvaděče. Když je dílna provozována, tak se kondenzátorová baterie spíná. Výhodné využití je ve výrobních linkách s velkým počtem asynchronních motorů. [3] [5]

Když se porovnává individuální kompenzace se skupinovou kompenzací, tak lze zjistit, že kompenzační prostředek ve skupinové kompenzaci je menšího kapacitního výkonu vzhledem k soudobosti spotřebičů, z čehož vyplývá výhodnější využití kondenzátorů. Další výhodou skupinové kompenzace je, že se vedení proudově odlehčuje od napájecího zdroje až po skupinový rozvaděč. [3] [5]

Nevýhodná skutečnost u skupinové kompenzace je, že není proudově odlehčené napájecí vedení od skupinového rozvaděče až ke spotřebičům, což má za následek, že žádné úspory na úbytku napětí a ztrátách se nevytvoří. U kondenzátorů se vyžadují pojistky, vypínače a vybíjecí odpory. Vybíjecí odpory jsou potřeba, aby kondenzátory nezůstaly nabité po vypnutí. Další nevýhodou je potřeba regulace kompenzačního prostředku, protože jalový výkon bude kolísat podle toho, jaké spotřebiče zrovna pracují a jaké budou mít nároky na jalový výkon. [3] [5]



Obrázek 13: Schéma zapojení při skupinové kompenzaci. [5]

3.1.3 Centrální kompenzace

Schéma zapojení při centrální kompenzaci je podobné jako u skupinové kompenzace, ale liší se tím, že kompenzační prostředek je zapojen rovnou v hlavním rozvaděči. Centrální kompenzace se používá pro větší množství kompenzovaných provozů neboli pro kompletní závod, kde se pro celý podnik kompenzuje jalový výkon jen v jednom místě, většinou v hlavní rozvodně. [3] [5]

U centrální kompenzace je výhodné, že kompenzační zařízení je jen na jediné pozici, a tudíž kontrola kompenzačního zařízení je velice přehledná. V porovnávání s předešlými možnostmi je hodnota kompenzačního výkonu kompenzačního prostředku z důvodu nesoučasnosti spotřebičů nejmenší a využití kompenzačního zařízení je největší. [5]

Nevýhodou je potřeba automatické regulace, kde kondenzátorová baterie se vybavuje komplikovanou samočinnou regulací. Princip této regulace tkví v postupném připojování dalších

kondenzátorů v závislosti na množství zapojených spotřebičů, což funguje při přepínání odboček baterie. Další nepříjemnost se stává v rozvodné síti podniku, která není odlehčená od jalového výkonu. [3] [5]

Aby se některý úsek napájecího vedení odlehčil, tak se kompenzační zařízení nepřipojí do hlavního rozvaděče, ale zapojí se na nějaký podružný rozvaděč, kde je spotřeba induktivního výkonu nejvyšší. [5]

3.1.4 Kombinovaná kompenzace

Tenhle způsob kompenzace je velice rozšířený, hlavně se využívá v průmyslových sítích, které jsou rozsáhlé. Jedná se o kombinaci již použitých způsobů kompenzací. [1]

3.2 Prostředky pro kompenzaci jalového výkonu

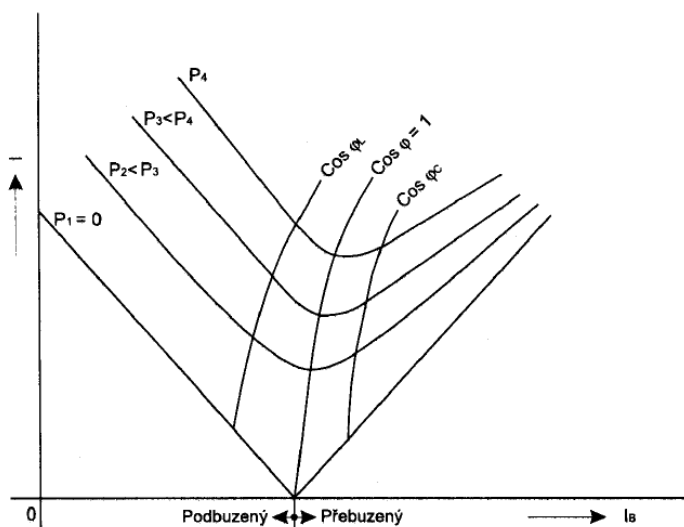
Jednotlivé kompenzační prostředky pro kompenzaci jalového výkonu se vybírají podle těchto vlastností, buď se zvolí podle velikosti vyžadovaného jalového výkonu nebo podle rychlosti změny kompenzované zátěže, a taky se určí podle toho, na jaké hladině napětí dochází ke kompenzací. [5]

Statické kondenzátory jako kompenzační zařízení jsou nejpříjemnější pro stabilní odběr, kde se vyžadovaný kompenzační výkon nemění s časem. Rotační kompenzátor se nehodí pro rychlé změny vyžadovaného kompenzačního výkonu, protože se tady projevuje setrvačnost rotoru. Je potřebný pro nestálé zatížení, kde se vyžadovaný kompenzační výkon s časem mění pomalu. Fázově řízený kompenzátor se používá hlavně pro nejrychlejší změny zatížení, kde dodávaný kompenzační výkon je potřeba pohotově měnit. [5]

3.2.1 Rotační kompenzátory

V porovnání se statickými kompenzačními prostředky jsou rotační kompenzační zařízení složitější na údržbu. U rotačních kompenzátorů je přínosné, že se buzením těchto strojů mění souvisle kompenzační výkon. Neprospěšné u těchto kompenzátorů je výskyt rotačních částí a velké činné ztráty (2–8 % jmenovitého výkonu). [5]

Synchronní stroj jako rotační kompenzátor pracuje naprázdno v přebuzeném stavu a do sítě dodává jalovou energii. U synchronních strojů se nezávislým budícím vinutím, které je napájeno ze stejnosměrného zdroje, dodává magnetizační energie. Synchronní elektromotory jsou hlavně používány pro pohony ventilátorů, kompresorů, čerpadel apod. Tyto elektromotory se používají hlavně tam, kde se očekává relativní ustálený zátěžný moment. Za předpokladu trvalého kmitočtu s konstantním napájecím napětím při dodržení stálého zátěžného momentu, se při změně hodnoty budícího proudu činný výkon motoru nemění. Také lze obměňovat účinník odběru motoru při přeměně budícího proudu v obou oblastech (induktivní a kapacitní oblast). Na obrázku č. 14 jsou vidět tzv. V-křivky, kde se jedná o závislost budícího proudu na statorovém proudu při trvalém výkonu. [1] [5]



Obrázek 14: V-křivky synchronního stroje. [5]

Řízením budícího proudu se získá při odlišném zatížení trvalý účinník, proto se častokrát na synchronní motory umisťují regulátory, které zabezpečí chod motoru i při obměnách činného zatížení a to buď s trvalým jalovým výkonem nebo se stálým účinníkem. Díky tomu lze funkčně kompenzovat jalový výkon paralelně zapojených spotřebičů za použití synchronních motorů. [1] [5]

Synchronní stroje jsou navrhovány většinou pro sítě VN (zpravidla 6 kV), protože je určitým zdržením zatížena odezva na nezbytnou změnu jalového výkonu. Proto pro kompenzaci spotřebičů, ve kterých se odběr jalového výkonu obměňuje dynamicky, se synchronní motory nehodí. Například se jedná o obloukové pece, kde dochází k nedokompenzování po určitý čas, než tyto synchronní stroje vlivem opoždění navýší svůj kompenzační výkon. Po jistém časovém intervalu, kdy tento kompenzační výkon již není vyžadován, se příslušný výkon dále dodává, což pro celkové kolísání napětí, které závisí na změnách jalového výkonu, bude mít špatný vliv. [1] [5]

Synchronní stroje se používají hlavně pro centrální kompenzaci větších průmyslových sítí, protože mají velké výkony (od 1 do 15 Mvar) a regulace jalového výkonu je pomalá. [1] [5]

3.2.2 Statické kompenzátory

Statické kompenzační prostředky nezávisí na dodávce činné energie v porovnání s rotačními kompenzátory. Statické kompenzátory se skládají v obvyklých zapojeních z pasivních kompenzačních členů, což většinou jsou výkonové kondenzátory. U nových technologií se používají tzv. aktivní filtry. [1]

3.2.2.1 Statické kondenzátory

Jedná se o kondenzátor, který se používá ve střídavých sítích pro zdokonalení účinníku elektrických zařízení. Statické kondenzátory mají na rozdíl od rotačních kompenzátorů výhodu v tom, že neobsahují ani jednu točivou část a mají nižší náklady. Další výhodou jsou nízké ztráty, které dosahují od 0,3 do 0,5 % jmenovitého výkonu. [1] [5]

U statických kondenzátorů je nevýhodné, že se může vytvořit přepětí při rozpínání nebo spínání obvodů. K nevýhodám patří i skoková změna kompenzačního výkonu, kde jeho obměnu lze v obvyklém provedení vykonat pouze odpojováním či připínáním dílčích kondenzátorů. Aby se dosáhlo souvislého řízení kompenzačního výkonu, tak je potřebné aplikovat fázové řízení. Další nevýhodou je potřeba zařízení pro vybití statického kondenzátoru, protože na statickém kondenzátoru po odpojení od zdroje elektrického napětí setrvává po jistou dobu elektrický náboj. Většinou se používají vybíjecí odporníky jako vybíjecí zařízení. [3] [5]

Vzorec pro jalový výkon Q_C jednofázového kondenzátoru:

$$Q_C = U^2 \cdot \omega \cdot C \quad [\text{var}] \quad (3.1)$$

Další výraz pro výpočet jalového výkonu Q_C s efektivními hodnotami proudu a napětí:

$$Q_C = U \cdot I \quad [\text{var}] \quad (3.2)$$

Dosazením vztahu (3.2) do vzorce (3.1) získáme nový vztah pro jalový výkon Q_C :

$$Q_C = \frac{I^2}{\omega \cdot C} \quad [\text{var}] \quad (3.3)$$

Pro kondenzátor zapojený do hvězdy v trojfázové síti platí vztah:

$$Q_C = 3 \cdot U^2 \cdot \omega \cdot C_Y \quad [\text{var}] \quad (3.4)$$

$$Q_C = \sqrt{3} \cdot U \cdot I \quad [\text{var}] \quad (3.5)$$

$$Q_C = \frac{3 \cdot I^2}{\omega \cdot C_Y} \quad [\text{var}] \quad (3.6)$$

Pro kondenzátor zapojený do trojúhelníka v trojfázové síti platí vzorec:

$$Q_C = 3 \cdot U^2 \cdot \omega \cdot C_D \quad [\text{var}] \quad (3.7)$$

$$Q_C = \sqrt{3} \cdot U \cdot I \quad [\text{var}] \quad (3.8)$$

$$Q_C = \frac{I^2}{\omega \cdot C_D} \quad [\text{var}] \quad (3.9)$$

Předešlé vzorce budou platit, jestliže budou mít všechny kondenzátory totožné hodnoty kapacity čili bude zajištěna symetrie u trojfázového zapojení. [1] [5]

Důležitou vlastností kondenzátorů je jejich kvalita. Na kvalitu mají vliv hlavně ztráty, které se skládají z různých prvků, jako jsou kupříkladu vybíjecí odpory, vnitřní pojistky, ztráty dielektrika a tak dále. Předpokládá-li se, že napětí bude mít sinusový průběh, tak výsledné ztráty kondenzátoru budou dány podle tohoto vztahu: [1] [5]

$$P_Z = \tan \delta \cdot Q_C \quad [\text{W}] \quad (3.10)$$

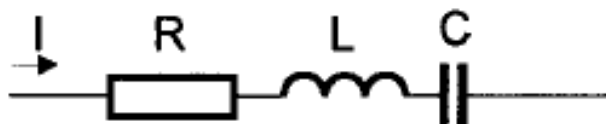
Tangenta ztrátového úhlu se označuje $\tan \delta$ a zvyšuje se, jak při rostoucí teplotě, tak i při snižující se teplotě pod 0 °C, což znamená že $\tan \delta$ je závislá na teplotě. Veličinou $\tan \delta$ jsou reprezentovány zmiňované ztráty. Tangenta ztrátového úhlu také určuje poměr mezi ekvivalentním sériovým R a X_C při určitém sinusovém průběhu napětí a frekvence. [1] [5]

Pro výsledné ztráty kondenzátoru při neharmonickém průběhu platí vzorec:

$$P_S = 2 \cdot \pi \cdot C \cdot \sum_{n=1}^{\infty} n \cdot U_n^2 \cdot f_n \cdot \tan \delta \quad [\text{W}] \quad (3.11)$$

3.2.2.2 Chráněné kompenzační sekce

Lze zjednodušit základní schéma kompenzačního obvodu na snadný sériový RLC článek. [1]



Obrázek 15: Snadný sériový RLC článek. [5]

Prvky sériového RLC článku dokážou pracovat v rozsáhlém spektru frekvencí. V tomto spektru kmitočtů jsou dvě důležité frekvence, jde o rezonanční frekvenci f_r a jmenovitou pracovní frekvenci f_n . [1]

Vlivem vztahu k oběma frekvencím je řád harmonické n dán tímto výrazem, při kterém dochází k rezonanci: [1]

$$n_r = \frac{f_r}{f_n} \quad [-] \quad (3.12)$$

Pro činitel zatlumení platí:

$$p = \frac{1}{n_r^2} \quad [-] \quad (3.13)$$

Činitel zatlumení se označuje p . Jeho jednotka se uvádí dvěma variantami, buď v procentech (%) anebo v poměrných číslech (-). [1]

Jestliže je splněn tento předpoklad $X_L \ll X_C$, tak lze použít ochranné tlumivky a platí že:

$$X_L = -p \cdot X_C \quad [\Omega] \quad (3.14)$$

U kompenzačních kondenzátorů nezáleží na tom, zda budou zapojeny ve hvězdě nebo v trojúhelníku. Rozumnější je vykonávání většiny úvah ve spojitosti k fázovému napětí U_{FN} , což znamená provádět matematické operace s napětím fázovým U_{FN} , s fázovými reaktancemi tlumivek X_{LN} a kondenzátorů X_{CN} . [1] [5]

Kompenzační článek je zapojení kondenzátoru s určitou tlumivkou. Při splnění frekvenční podmínky, kde f musí být menší než f_r , bude výchozí reaktance kondenzátoru vždy větší než reaktance kompenzačního článku. [1] [5]

Vzorec pro reaktanci kompenzačního článku je:

$$X_{LC} = (1 - p) \cdot X_C \quad [\Omega] \quad (3.15)$$

Reaktance předřazených tlumivek nebo sítě způsobuje zvětšení napětí u kompenzačních kondenzátorů, proto aby se toto zvětšené napětí respektovalo, tak se kompenzační kondenzátory přizpůsobují na napětí $U_{CN} = 440 \text{ V}$ a na frekvenci $f_N = 50 \text{ Hz}$. [1] [5]

Pro reaktanci kompenzačního kondenzátoru platí vztah:

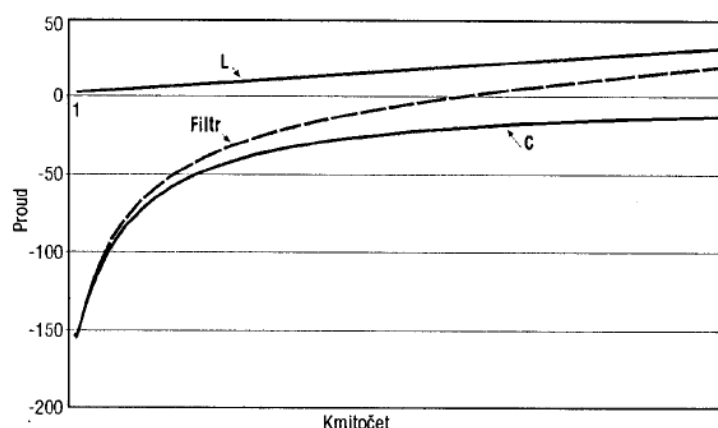
$$X_C = \frac{U_{CN}^2}{Q_C} \quad [\Omega] \quad (3.16)$$

3.2.2.3 Filtry pro kompenzaci

Výkonový sériový LC filtr je kompenzační filtr, který se používá pro zlepšení účinníku a zároveň pro filtraci proudů s harmonickým průběhem. Tenhle filtr tvoří rezonanční sériový RLC obvod, který obsahuje odpor, tlumivku a kondenzátor. Odpor reprezentuje čistě ohmickou složku a kondenzátor spolu s tlumivkou představují čistě reaktivní složky. [1]

Výraz pro impedanci popsaného obvodu je dán:

$$Z = R + j \left(\omega \cdot L - \frac{1}{\omega \cdot C} \right) \quad [\Omega] \quad (3.17)$$



Obrázek 16: Kmitočtové charakteristiky C , L a LC filtru. [1]

Na obrázku č. 16 je možno zhlédnout kmitočtovou charakteristiku reaktance kondenzátoru X_C , reaktance tlumivky X_L a také kmitočtovou charakteristiku sériového LC filtru. Důležitý údaj je rezonanční kmitočet filtru ω_r , který se stanoví pomocí průsečíku s osou kmitočtů. Z tohoto údaje se určí chování kompenzačního filtru, který se bude chovat buď jako tlumivka nebo jako kondenzátor. Kompenzační filtr se bude chovat jako tlumivka, když kmitočet bude vyšší než ω_r , z čehož vyplývá že bude mít induktivní charakter. Když bude mít filtr kmitočet nižší než je ω_r , tak se bude prezentovat jako kondenzátor, což znamená že bude mít kapacitní charakter. [1]

4 Druhy řízení kompenzačního výkonu

4.1 Stupňovité řízené kompenzační zařízení

Při tomhle způsobu řízení výkonu je velmi podstatné, jaký bude zvolený počet stupňů a jaká bude jejich velikost. Zvolený počet stupňů závisí na požadované hodnotě účinníku, na skutečné velikosti jednoho stupně a na výsledném požadovaném kompenzačním výkonu. Provádí se to jak pro kompenzační zařízení bezkontaktní, tak i pro kompenzační zařízení kontaktní v hladinách NN i VN. [1] [5]

Aby se požadována hodnota účinníku co nejvíce přibližovala k hodnotě $\cos\varphi_0 \geq 0,95$ nebo $\tan\varphi_0 \leq 0,33$, tak musí být splněn výraz: [2] [1]

$$\tan\varphi_0 \geq \frac{Q_L - N \cdot Q_{C1}}{P} \quad [-] \quad (4.1)$$

Pro počet stupňů kompenzačního zařízení platí vztah:

$$N \geq \frac{Q_L - P \cdot \tan\varphi_0}{Q_{C1}} \quad [-] \quad (4.2)$$

4.1.1 Kontaktní kompenzační zařízení

Princip regulovaných kontaktních kompenzačních zařízení je založen na připínání chráněných kompenzačních sekcí nebo kondenzátorů na síť, která je kompenzována. Tohle přímé připínání funguje podle příkazů regulátorů jalového výkonu. V sítích, kde se nenacházejí harmonické složky proudu a kde není nutná velká rychlost kompenzace, se využívají kontaktní kompenzační zařízení s prostými kondenzátory. [1] [5]

Velká nevýhoda při aplikování stykačů je v tom, že při nepřesně určeným kontaktním připnutí kondenzátoru na síť, může dojít k vytvoření přechodových jevů. U kontaktních kompenzačních zařízení je při nesynchronním spínání nevýhodné, že při sepnutí se vytvoří rušivé jevy, které mají zpětný vliv na síť. Většinou zapříčiní impulsní rušení měřicí techniky, elektronických zařízení a výpočetní techniky. Předřazením ochranných tlumivek a také aplikováním spínacích kontaktních součástek, lze neúplně odstranit tuto nevýhodu. [1] [5]

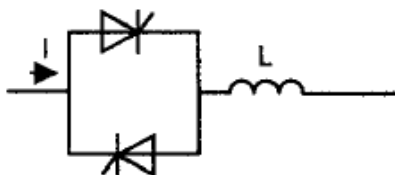
4.1.2 Bezkontaktní kompenzační zařízení

V sítích, kde je nutné velmi rychle měnit jalový výkon, se využívají bezkontaktní kompenzační zařízení. Dále je důležité mít rychlejší regulátor jalového výkonu, kde rychlost regulace jalového výkonu závisí na algoritmu, kterého regulátor využívá. Před kondenzátory se většinou připojují ochranné tlumivky. V praxi se používá obdobný regulační princip jako je u kontaktních kompenzačních zařízení. Rozdíl je jen v tom, že připínání a odepínání dílčích stupňů se provádí o něco rychleji. [1] [5]

4.2 Plynule řízené kompenzační prostředky

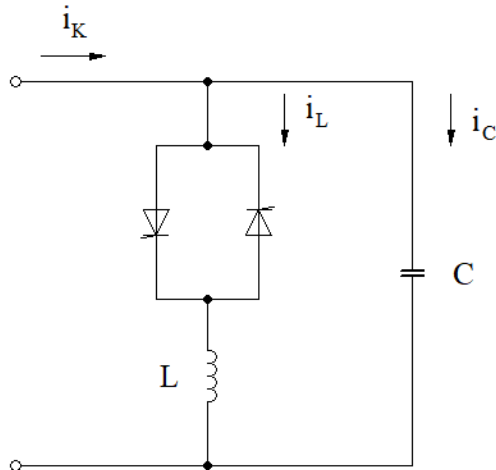
4.2.1 Pasivní (s dekompenzačními prvky)

Na obrázku č. 17 je znázorněno schéma obvodu, které se skládá z antiparalelního zapojení fázově ovládaného tyristorového spínače a z dekompenzační tlumivky. Tenhle obvod umožňuje ovládat plynule jalový proud, pomocí řízení proudu, který protéká tlumivkou. Jedná se o ovládání induktivního proudu, protože se v obvodě nachází tlumivka. Tento induktivní proud se obměňuje od 0 až do maximální hodnoty podle impedance tlumivky L . [1] [5]



Obrázek 17: Schéma obvodu fázově ovládaného induktivního proudu. [5]

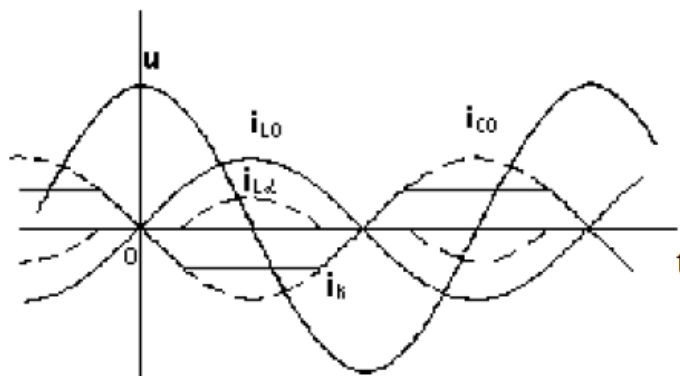
Jestliže ale bude potřeba ovládat kapacitní proud, tak nelze jenom místo tlumivky použít kondenzátor a zapojit to s antiparalelním zapojením fázově ovládaného tyristorového spínače. Kdyby se takhle ten obvod zapojil, tak by vznikl problém s přechodovými jevy. Tenhle problém lze vyřešit tak, že s k obvodu z obrázku č. 17 zapojí paralelně kondenzátor. [1] [5]



Obrázek 18: Schéma obvodu fázově ovládaného kapacitního proudu.

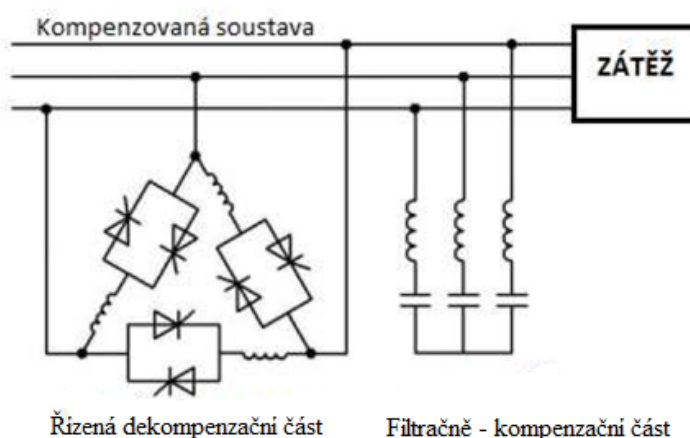
Z důvodu přepět'ových dějů se nedá bez problémů spínat kondenzátor C za pomoci antiparalelního zapojení fázově ovládaného tyristorového spínače. Proto je nutné spínat tlumivku L a mít kondenzátor C trvale připojený. Při sepnutí tyristorů vzniká určitý úhel zpoždění, který se značí α a na tomto úhlu zpoždění α závisí kompenzační výkon. Když bude $\alpha = 0$, tak dojde k největšímu otevření a proudy na tlumivce a kondenzátoru budou v protifázi a jejich velikost bude shodná, z čehož vyplývá, že kompenzační výkon je 0. Kompenzační prostředek bude dodávat kompenzační proud i_K

tehdy, když se během tzv. zavírání proudu i_L projeví účinek i_C . Tento princip je znázorněn na obrázku č. 19. [1] [5]



Obrázek 19: Časové průběhy napětí a proudů ze schématu s kondenzátorem. [5]

Tahle metoda kompenzace se v praxi používá hlavně v trojfázové síti. Dekompenzační člen se zapojuje do trojúhelníku. Hlavní důvod, proč se nezapojuje do hvězdy je, že by všemi fázovými vodiči protékal shodný proud, jaký protéká tlumivkou a tyristorovým spínačem. Tohle by mělo za následek, že by fázovými vodiči protékaly proudy všech harmonických, které vlastní ovládaný proud tlumivky. Nevýhoda je v tom, že musíme tlumivku dimenzovat na větší proud. Místo kompenzačního kondenzátoru se používají filtry určitých vyšších harmonických řádů. Jedná se o sériové rezonanční zapojení, které vyvolá v rezonanci pro určitou harmonickou zkrat. Na obrázku č. 20 je nakresleno schéma obvodu trojfázového plynule ovládaného kompenzátoru s dekompenzačním prvkem. Hlavní využití plynule ovládaných pasivních kompenzátorů je tam, kde se kompenzační výkon mění velice rychle. [1] [5]



Obrázek 20: Schéma zapojení plynule ovládaného kompenzátoru v trojfázové síti. [1]

4.2.2 Aktivní

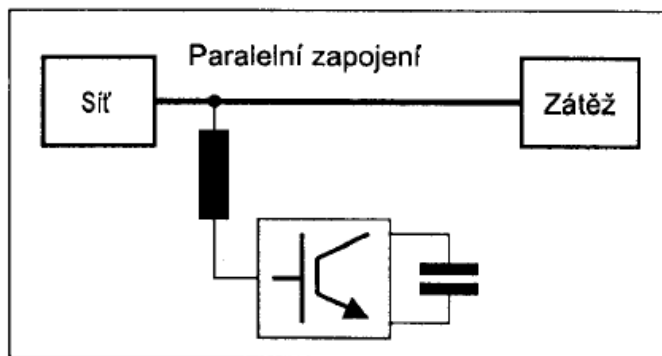
Kompenzační prostředek jako je aktivní filtr, si lze představit jako generátor, který je zapojen paralelně nebo sériově a je ovládán přijatelným regulačním systémem tak, že zabezpečí žádanou kompenzaci nežádoucích harmonických složek i v dynamických situacích. Pomocí aktivního filtru se zdokonalí napětí, proud nebo dokonce obě dvě veličiny podle toho, jakou metodou se připojí do

elektrické sítě aktivní filtr. Aktivní filtry se rozděluje na paralelní, sériové a také na kombinované aktivní filtry. [1] [5]

4.2.2.1 Paralelní aktivní filtr

Jedná se o ovládaný generátor proudu, který je připojený k spotřebiči paralelně. Paralelní aktivní filtr je používán hlavně k eliminování nevhodných harmonických složek proudu takovou metodou, že vytváří stejné harmonické složky obráceného směru a dodává je do sítě. Výsledek je pak takový, že konečný proud je bez zvolených harmonických složek. Tenhle princip se přesně používá k filtraci proudu, který odebíráme z elektrické sítě, ale také se tímto principem upravují deformace napětí, které vyvolá připojený spotřebič. Výhodou je, že lze kdykoliv sestavit selektivní kompenzaci v místech, kde se hned harmonické složky proudu objeví bez obav, že by mohlo dojít k nežádoucí rezonanci. Další funkcí filtru je možnost nesymetrickou zátěž upravit na symetrickou za použití nesousledných a sousledných složek. [1] [5]

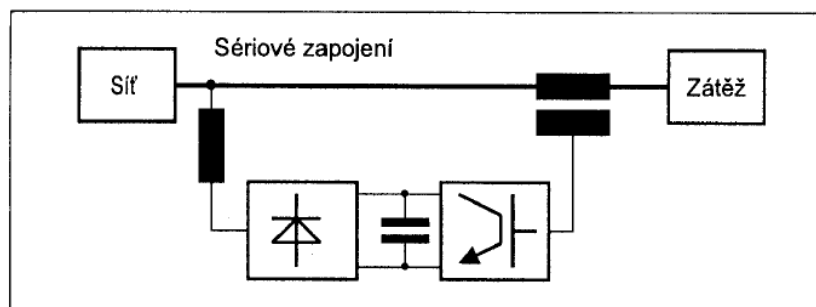
Paralelní aktivní filtr jako generátor napětí nebo proudu je možné vytvořit můstkovým zapojením polovodičových spínačů (IGBT). Skládá se ze zdroje proudu nebo napětí a také z šesti spínačů v zapojení pro trojfázovou síť. Když se budou tranzistory můstku správně spínat, tak lze získat žádaný průběh proudu, který prochází do aktivního filtru. Nevýhoda tohoto proudu je taková, že v okruhu spínací frekvence zahrnuje značný počet harmonických. Ze zmíněného důvodu je potřebné vložit pasivní filtr mezi svorky aktivního filtru a napájecí síť, protože pak bude pasivní filtr fungovat jako dolní propust. Na obrázku č. 21 je znázorněno schéma paralelního aktivního filtru. [1] [5]



Obrázek 21: Schéma zapojení paralelního aktivního filtru, který je zapojen do sítě. [5]

4.2.2.2 Sériový aktivní filtr

Generátorem napětí je tvořen tento aktivní sériový filtr, který se připojuje mezi vývody zátěže a vývody elektrické sítě. Hlavní funkce aktivního sériového filtru je upravit dodané napětí na žádaný průběh. Je to obdobné jak u paralelního aktivního filtru, který ale místo napětí upravuje proud na žádaný průběh. Z čehož vyplývá, že dokáže eliminovat harmonické složky, dále dokáže konstantně držet maximální hodnotu napětí neboli amplitudu napětí a také je schopen zabezpečit, aby napětí bylo symetricky rozděleno. Další vlastností tohoto filtru je, že jestliže bude aktivnímu sériovému filtru dodávána elektrická energie od nezávislého zdroje, tak může elektrickou energii dodávat při výpadku elektrického proudu. Na obrázku č. 22 je nakresleno schéma sériového aktivního filtru. [1] [5]



Obrázek 22: Schéma zapojení sériového aktivního filtru, který je zapojen do sítě. [5]

Na závěr lze říct, že u paralelního aktivního filtru se začínají upravovat vlastnosti elektrické sítě od spotřebiče směrem až ke zdroji elektrické energie, což znamená, že paralelní aktivní filtr srovnává rušivé vlivy spotřebiče. U sériového aktivního filtru to funguje opačně, což znamená, že se vlastnosti elektrické sítě upravují od zdroje elektrické energie směrem až k zátěži. Takže sériový aktivní filtr dodává spotřebiči napětí, které je kvalitnější. [1] [5]

4.2.2.3 Kombinovaný aktivní filtr

Kombinovaný aktivní filtr je vlastně kombinace paralelního a sériového aktivního filtru. Pomocí této kombinace se vytvoří nový systém, který dokáže zabezpečit vyhovující napětí v prostoru, kde se zapojí filtr a dále také dokáže zabezpečit přesně určený odebíraný tvar proudu. [1] [5]

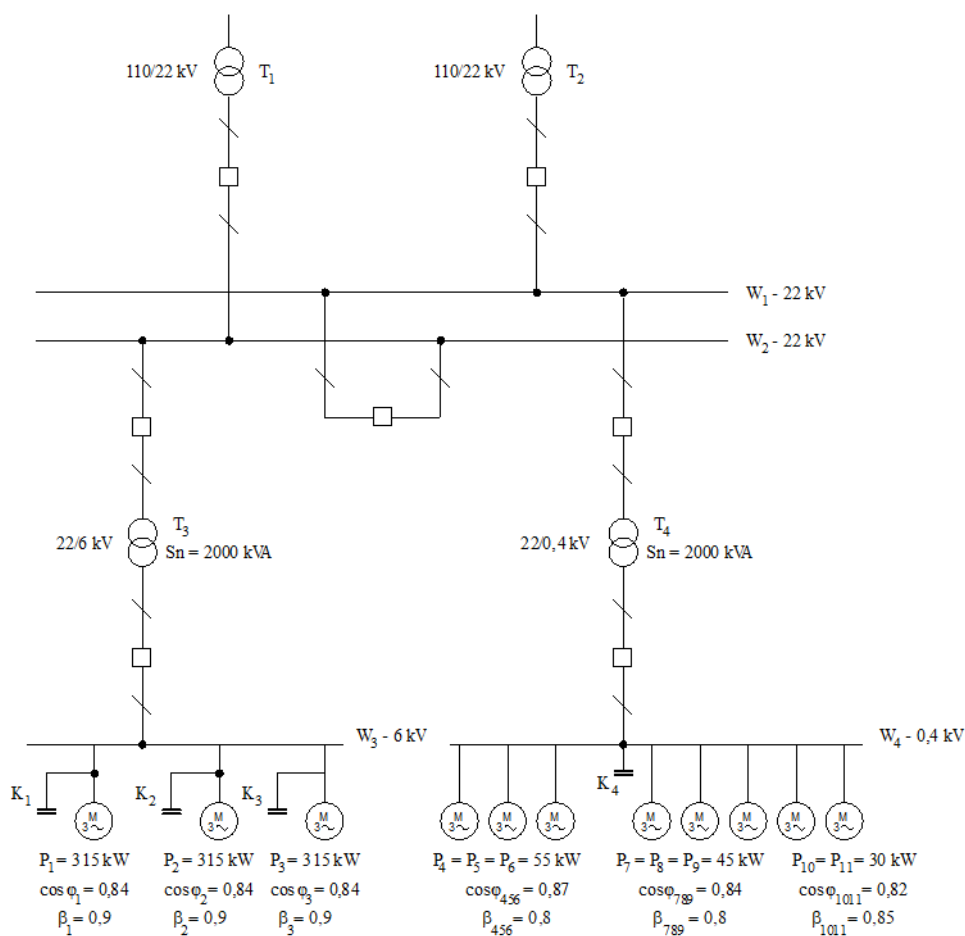
4.3 Kombinované kompenzační prostředky

Jedná se o kombinaci předešlých řízení kompenzačního výkonu. Kdysi se v praxi používalo hlavně řízení, kde stupňovitý bezkontaktní kompenzační prostředek byl kombinován spolu s plynulým ovládaným kompenzačním prostředkem. Nyní se používá většinou kombinace aktivního filtru a stupňovitého kompenzačního prostředku. [1] [5]

5 Praktický návrh kompenzace

5.1 Zadání

Jedná se o průmyslovou síť napájenou dvěma příklady 110 kV, které jsou transformovány na 22 kV. Každý transformátor je připojen na jinou systémovou přípojnicí, které lze spínačem přípojnic spojit dohromady, pro případný krátkodobý paralelní chod totožných transformátorů T_1 a T_2 110/22 kV. Toto je řešeno z důvodu možné provozní poruchy jednotlivého transformátoru T_1 nebo T_2 . Z přípojnice W_1 je napojený transformátor T_3 , který snižuje napětí z 22 kV na 0,4 kV a napájí okruh 0,4 kV, ve kterém jsou připojeny tři motory o výkonu 45 kW s účinností $\cos\varphi_{789} = 0,84$ a s předpokládaným součinitelem náročnosti $\beta_{789} = 0,8$. Dále se tam nachází dva motory o výkonu 30 kW s $\cos\varphi_{1011} = 0,82$ a $\beta_{1011} = 0,85$. A jako poslední jsou tam připojeny tři motory o výkonu 55 kW s účinností $\cos\varphi_{456} = 0,87$ a součinitelem náročnosti $\beta_{456} = 0,8$. Tyto motory jsou pak dále ovládány frekvenčním měničem. Transformátor T_4 je napojený z přípojnice W_2 a transformuje napětí z 22 kV na 6 kV. Na napěťové hladině 6 kV se nacházejí tři motory o výkonu 315 kW, kde každý z těchto motorů má součinitel náročnosti 0,9 a jsou kompenzovány individuální kompenzací na účinník 0,84. Cílem je navrhnout novou kompenzaci v obou uvedených napěťových hladinách 0,4 kV a 6 kV na hodnotu $\cos\varphi_K = 0,97$.



Obrázek 23: Schéma návrhu kompenzované sítě.

5.2 Návrh nové kompenzace pro napět'ovou hladinu 0,4 kV

V napět'ové hladině 0,4 kV se nachází 8 asynchronních motorů, které mají menší účinník, než je požadovaný v zadání příkladu, proto je nutné navrhnout novou kompenzaci tak, aby se účinník zdokonalil na hodnotu $\cos\varphi_K = 0,97$. Pro tuto napět'ovou hladinu bude navrhována skupinová kompenzace, ve které se jedna společná kompenzační baterie zapojí k přípojnícím skupinového rozvaděče. Skupinová kompenzace byla zvolena hlavně z důvodu, že je vyžadováno, aby asynchronní motory byly schopné pracovat buď samostatně nebo společně v různém časovém okamžiku. Skupinová kompenzace bude navrhována jako hrazená, protože se v síti nacházejí harmonické, které mohou být nebezpečné z důvodu přetěžování kondenzátorů v kompenzačním rozvaděči, což může mít za následek snížení životnosti kondenzátorů. Proto je nutné použít hrazenou kompenzaci, která chrání danou instalaci před rezonancí. Kondenzátory přetěžuje hlavně pátá harmonická, která má hodnotu frekvence 250 Hz a sedmá harmonická s hodnotou frekvence 350 Hz. Tyto harmonické vytváří frekvenční měnič. [12] [14]

Dále je nutné určit činitele zatlumení p , který je důležitý pro návrh hrazeného kompenzačního rozvaděče. Činitel zatlumení p se určí s ohledem na nejmenší harmonickou, která se nachází v dané elektrické síti, což je v tomto případě pátá harmonická s hodnotou frekvence 250 Hz a s ohledem na frekvenci, při kterém je vysílán signál HDO neboli hromadné dálkové ovládání, což je v tomto případě hodnota frekvence $216 \frac{2}{3}$ Hz. Rezonanční frekvence se tedy zvolí $f_r = 189$ Hz. Z ekonomického hlediska je lepší zvolit činitel zatlumení co nejmenší, protože čím je větší činitel zatlumení, tím jsou zapotřebí větší tlumivky. [14]

Výpočet činitele zatlumení pomocí rezonanční frekvence f_r a pracovního kmitočtu f_n :

$$p = \frac{1}{\left(\frac{f_r}{f_n}\right)^2} \cdot 100 = \frac{1}{\left(\frac{189}{50}\right)^2} \cdot 100 = 7 \% \quad (5.1)$$

Hodnota činitele zatlumení je tedy 7 % a podle této hodnoty se bude celá kompenzace navrhovat.

5.2.1 Určení kompenzačních stupňů

Pro napět'ovou hladinu 0,4 kV se navrhne stupňovitá řízená kompenzace, kde spínání jednotlivých stupňů se provede pomocí stykačů.

Výpočet výsledného výkonu asynchronních motorů s 55 kW a účinníkem $\cos\varphi_{456} = 0,87$:

$$P_{456} = P_4 + P_5 + P_6 = 55 \cdot 10^3 + 55 \cdot 10^3 + 55 \cdot 10^3 = 165 \text{ kW} \quad (5.2)$$

$$P_{P456} = P_{456} \cdot \beta_{456} = 165 \cdot 10^3 \cdot 0,8 = 132 \text{ kW} \quad (5.3)$$

$$S_{456} = \frac{P_{P456}}{\cos\varphi_{456}} = \frac{132 \cdot 10^3}{0,87} = 151,7 \text{ kVA} \quad (5.4)$$

$$Q_{456} = \sqrt{S_{456}^2 - P_{P456}^2} = \sqrt{(151,7 \cdot 10^3)^2 - (132 \cdot 10^3)^2} = 74,7 \text{ kvar} \quad (5.5)$$

Výpočet výsledného výkonu asynchronních motorů s 45 kW a účíníkem $\cos\varphi_{789} = 0,84$:

$$P_{789} = P_7 + P_8 + P_9 = 45 \cdot 10^3 + 45 \cdot 10^3 + 45 \cdot 10^3 = 135 \text{ kW} \quad (5.6)$$

$$P_{P789} = P_{789} \cdot \beta_{789} = 135 \cdot 10^3 \cdot 0,8 = 108 \text{ kW} \quad (5.7)$$

$$S_{789} = \frac{P_{P789}}{\cos\varphi_{789}} = \frac{108 \cdot 10^3}{0,84} = 128,57 \text{ kVA} \quad (5.8)$$

$$Q_{789} = \sqrt{S_{789}^2 - P_{P789}^2} = \sqrt{(128,57 \cdot 10^3)^2 - (108 \cdot 10^3)^2} = 69,8 \text{ kvar} \quad (5.9)$$

Výpočet výsledného výkonu asynchronních motorů s 30 kW a účíníkem $\cos\varphi_{1011} = 0,82$:

$$P_{1011} = P_{10} + P_{11} = 30 \cdot 10^3 + 30 \cdot 10^3 = 60 \text{ kW} \quad (5.10)$$

$$P_{P1011} = P_{1011} \cdot \beta_{1011} = 60 \cdot 10^3 \cdot 0,85 = 51 \text{ kW} \quad (5.11)$$

$$S_{1011} = \frac{P_{P1011}}{\cos\varphi_{1011}} = \frac{51 \cdot 10^3}{0,82} = 62,19 \text{ kVA} \quad (5.12)$$

$$Q_{1011} = \sqrt{S_{1011}^2 - P_{P1011}^2} = \sqrt{(62,19 \cdot 10^3)^2 - (51 \cdot 10^3)^2} = 35,6 \text{ kvar} \quad (5.13)$$

Výpočet celkového výkonu všech asynchronních motorů:

$$P_P = P_{P456} + P_{P789} + P_{P1011} = 132 \cdot 10^3 + 108 \cdot 10^3 + 51 \cdot 10^3 = 291 \text{ kW} \quad (5.14)$$

$$S = S_{456} + S_{789} + S_{1011} = 151,7 \cdot 10^3 + 128,57 \cdot 10^3 + 62,19 \cdot 10^3 = 342,46 \text{ kVA} \quad (5.15)$$

$$Q = Q_{456} + Q_{789} + Q_{1011} = 74,7 \cdot 10^3 + 69,8 \cdot 10^3 + 35,6 \cdot 10^3 = 180,1 \text{ kvar} \quad (5.16)$$

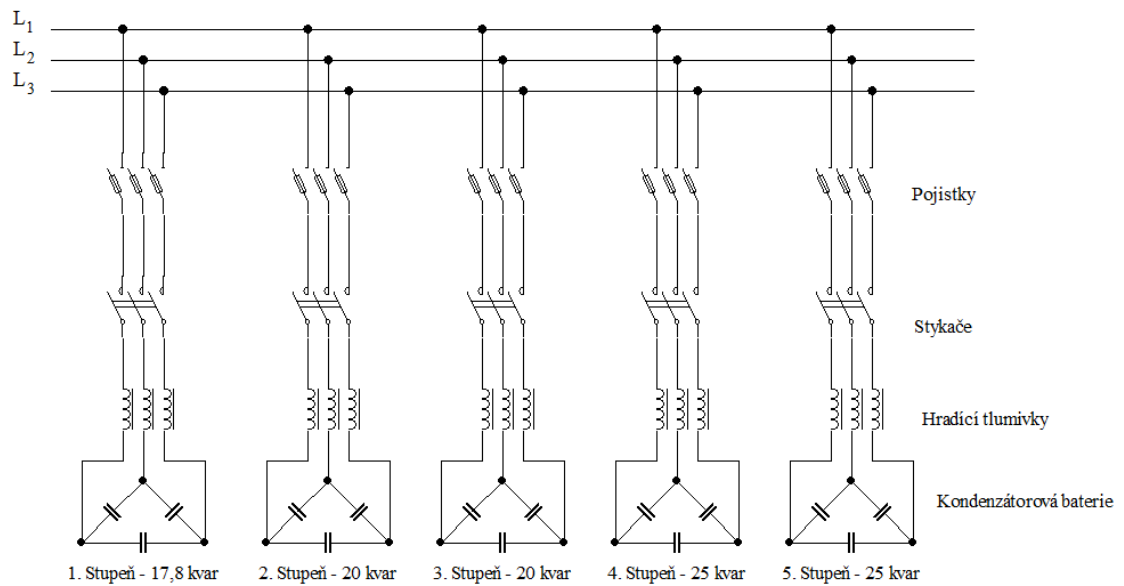
Výpočet potřebného kompenzačního výkonu s účíníkem $\cos\varphi_K = 0,97$:

$$S_K = \frac{P_P}{\cos\varphi_K} = \frac{291 \cdot 10^3}{0,97} = 300 \text{ kVA} \quad (5.17)$$

$$Q_K = \sqrt{S_K^2 - P_P^2} = \sqrt{(300 \cdot 10^3)^2 - (291 \cdot 10^3)^2} = 72,9 \text{ kvar} \quad (5.18)$$

$$Q_{komp} = Q - Q_K = 180,1 \cdot 10^3 - 72,9 \cdot 10^3 = 107,2 \text{ kvar} \quad (5.19)$$

Aby byl dosažen účíník $\cos\varphi_K = 0,97$, tak je nutné dodat vypočtený kompenzační výkon, který má hodnotu $Q_{komp} = 107,2 \text{ kvar}$. Tento potřebný kompenzační výkon se dodá pomocí hrazeného kompenzačního rozvaděče se stupňovitou řízenou kompenzací, který je na obrázku č. 24.



Obrázek 24: Hrazený kompenzační rozvaděč se stupňovitou kompenzací.

V hrazeném kompenzačním rozvaděči se celkový kompenzační výkon rozdělí na pět stupňů s hodnotami 1x17,8 kvar, 2x20 kvar a 2x25 kvar. Dohromady v kompenzačním rozvaděči bude pět stupňů, kde každý z těchto stupňů bude obsahovat stykač, tlumivku, pojistku a kompenzační baterii. [14]

5.2.2 Volba kondenzátorů pro jednotlivé stupně

Hlavní funkce kompenzačních kondenzátorů je tedy kompenzování induktivního jalového výkonu elektrických motorů. Pro jednotlivé kompenzační stupně se použijí kondenzátory od výrobce VISHAY.

5.2.2.1 Určení kondenzátorů pro stupeň s hodnotou 17,8 kvar

Nejdříve se určí proud, který daným kondenzátorem protéká a jeho hodnota činí:

$$I = \frac{Q_C}{\sqrt{3} \cdot U_S} = \frac{17800}{\sqrt{3} \cdot 400} = 25,7 \text{ A} \quad (5.20)$$

Aby byly určeny vhodné hodnoty kondenzátorů pro stupeň s kompenzačním výkonem 17,8 kvar, tak je třeba respektovat účinky tlumivek, které se použijí v daném stupni. Zapojení tlumivky s kondenzátorem do série má za následek, zvýšení napětí na kondenzátoru na hodnotu U_C , takže je nutné určit, na jakou hodnotu napětí jsou kondenzátory dimenzovány. [14]

Výpočet hodnoty napětí na kondenzátoru U_C s uvažováním činitele zatlumení:

$$U_C = \frac{U_S}{1-p} = \frac{400}{1-0,07} = 430 \text{ V} \quad (5.21)$$

Napětí na kondenzátoru se vlivem tlumivky zvětší na hodnotu 430 V, což je větší hodnota napětí, než se nachází v elektrické síti $U_S = 400 \text{ V}$. Takže je vyloučeno použití kondenzátor, který je dimenzován na jmenovitou sdruženou hodnotu 400 V. To znamená, že se použije kondenzátor, který je konstruován na napětíovou hladinu 440 V. [14]

Kapacita jednoho kondenzátoru C se vypočte pomocí vztahu:

$$C = \frac{I}{U_C \cdot 2 \cdot \pi \cdot f} = \frac{\frac{25,7}{\sqrt{3}}}{430 \cdot 2 \cdot \pi \cdot 50} = 109,8 \mu F \quad (5.22)$$

Jako poslední se vhodně zvolí trojfázové kompenzační kondenzátory NN z katalogu, které budou mít podobné hodnoty jako předešlé vypočítané údaje. Nejvíce podobné parametry má kondenzátor, který pochází od výrobce VISHAY pro napětovou hladinu 440 V a je znázorněn v tabulce č. 1. Protože se musí použít kondenzátor, který je dimenzován na napětovou hladinu 440 V, tak byl zvolen kondenzátor s kompenzačním výkonem 20 kvar. I když je velikost tohoto výkonu větší, než je požadovaný kompenzační výkon s hodnotou 17,8 kvar, tak to vůbec nevadí, protože se tento výkon zmenší vlivem hrazené kompenzace. [14]

Vypočte se následující vztah, aby bylo ověřeno, zda kondenzátorová baterie dokáže dodat potřebný kompenzační výkon i v zapojení s tlumivkou:

$$Q_{LC} = \frac{U_S^2}{(1-p) \cdot \left(\frac{U_{CN}^2}{Q_N} \right)} = \frac{400^2}{(1-0,07) \cdot \left(\frac{440^2}{20000} \right)} = 17,77 \text{ kvar} \quad (5.23)$$

Ze vztahu lze zjistit, že skutečná hodnota kompenzačního výkonu hrazené sekce Q_{LC} je téměř stejná jako hodnota potřebného kompenzačního výkonu daného stupně.

Tabulka 1: Trojfázové kompenzační kondenzátory NN z katalogu od firmy VISHAY. [10]

RATED VOLTAGE 440 V, 50 Hz, DELTA CONNECTION, UL / UL C								
CAN BE USED ALSO FOR 415 V								
TYPE	ARTICLE NO. (1)	OUTPUT kvar 440 V	OUTPUT kvar 415 V	CAP. μF	CURRENT A 440 V / 415 V	DIMENSIONS Ø x H mm	WEIGHT kg	DRAWING NO.
PhMKP440.3.12,50-A84	5341-48609-xx	12.5	11.1	3 x 68.5	16.4 / 15.5	84.4 x 190	1.3	3
PhMKP440.3.14,10-A84	5341-48610-xx	14.1	12.5	3 x 77.0	18.5 / 17.5	84.4 x 190	1.3	3
PhMKP440.3.15,00-A84	5341-48611-xx	15	13.3	3 x 82.2	19.7 / 18.6	84.4 x 190	1.3	3
PhMKP440.3.16,90-A84	5341-48612-xx	16.9	15	3 x 92.6	22.2 / 20.9	84.4 x 190	1.3	3
PhMKP440.3.18,80-A84	5341-48613-xx	18.8	16.67	3 x 103.0	24.7 / 23.3	84.4 x 265	1.7	3
PhMKP440.3.20,00-A84	5341-48614-xx	20	17.8	3 x 109.6	26.2 / 24.8	84.4 x 265	1.7	3
PhMKP440.3.22,50-A84	5341-48615-xx	22.5	20	3 x 123.3	29.5 / 27.8	84.4 x 265	1.7	3
PhMKP440.3.25,00-A84	5341-48616-xx	25	22.2	3 x 137.0	32.8 / 30.9	84.4 x 265	1.7	3
PhMKP440.3.28,10-A84	5341-48617-xx	28.1	25	3 x 154.0	36.9 / 34.8	84.4 x 265	1.7	3
PhMKP440.3.30,00-A84	5341-48618-xx	30	26.7	3 x 164.4	39.4 / 37.1	84.4 x 340	2.1	3
PhMKP440.3.14,10-B116	5341-47068-xx	14.1	12.5	3 x 77.0	18.5 / 17.5	116 x 160	1.5	4
PhMKP440.3.18,80-B116	5341-47015-xx	18.8	16.67	3 x 103.0	24.7 / 23.3	116 x 160	1.8	4
PhMKP440.3.20,00-B116	5341-47016-xx	20	17.8	3 x 109.6	26.2 / 24.8	116 x 160	1.8	4
PhMKP440.3.22,50-B116	5341-47017-xx	22.5	20	3 x 123.3	29.5 / 27.8	116 x 160	1.9	4
PhMKP440.3.25,00-B116	5341-47018-xx	25	22.2	3 x 137.0	32.8 / 30.9	116 x 190	2.0	4
PhMKP440.3.28,10-B116	5341-47020-xx	28.1	25	3 x 154.0	36.9 / 34.8	116 x 190	2.0	4
PhMKP440.3.30,00-B116	5341-47022-xx	30	26.7	3 x 164.4	39.4 / 37.1	116 x 190	2.2	4
PhMKP440.3.33,00-B136	5341-47602-xx	33	29.4	3 x 180.9	43.3 / 40.9	136 x 190	2.3	5

1. stupeň

2. a 3. stupeň

4. a 5. stupeň

5.2.2.2 Určení kondenzátorů pro stupně s hodnotou 20 a 25 kvar

Kompenzační kondenzátory NN se vypočtou a určí totožnou metodou jako v předchozím případě a zvolí se z katalogu od VISHAY pro napětovou hladinu 440 V, který je znázorněn v tabulce č. 1. Vypočtené parametry kondenzátorů pro stupně s hodnotou 20 a 25 kvar jsou uvedeny v tabulce č. 2.

Tabulka 2: Výsledné hodnoty kondenzátorů pro jednotlivé stupně.

Kompenzační stupeň	Potřebný kompenzační výkon Q_K	Proud kondenzátoru I	Kapacita kondenzátoru C	Výkon hrazené sekce Q_{LC}
	[kvar]	[A]	[μF]	[kvar]
2. a 3. stupeň	20	28,87	123,4	19,99
4. a 5. stupeň	25	36,08	154,2	24,97

5.2.3 Volba tlumivek pro jednotlivé stupně

5.2.3.1 Určení tlumivek pro stupeň s výkonem 17,8 kvar

Aby byly vhodně určeny hradící tlumivky NN pro daný kompenzační stupeň, tak je důležité stanovit její základní parametry.

Nejdříve se vypočítá reaktance kondenzátoru X_C :

$$X_C = \frac{1}{C \cdot \omega} = \frac{1}{C \cdot 2 \cdot \pi \cdot f} = \frac{1}{3 \cdot 109,8 \cdot 10^{-6} \cdot 2 \cdot \pi \cdot 50} = 9,7 \, \Omega \quad (5.24)$$

Dále se určí pomocí činitele ztlumení p také reaktance tlumivky X_L :

$$X_L = X_C \cdot p = 9,7 \cdot 0,07 = 0,68 \, \Omega \quad (5.25)$$

Další parametr hradící tlumivky je indukčnost L , která vyšla:

$$L = \frac{X_L}{2 \cdot \pi \cdot f} = \frac{0,68}{2 \cdot \pi \cdot 50} = 2,16 \, mH \quad (5.26)$$

Jako poslední se určí proud hrazené sekce I_{LC} :

$$I_{LC} = \frac{Q_{LC}}{\sqrt{3} \cdot U_S} = \frac{17770}{\sqrt{3} \cdot 400} = 25,65 \, A \quad (5.27)$$

Pro kompenzační stupně s hodnotou výkonu 17,8 kvar se určí pomocí vypočítaných údajů vhodné hradící tlumivky NN z katalogu. Hledaným údajům nejvíce odpovídají hradící tlumivky NN, které nabízí firma ZES SILKO. Zvolenou tlumivku lze vidět v tabulce č. 3. [14]

Tabulka 3: Hradící tlumivky NN z katalogu od firmy ZES SILKO. [12]

Q_C (kvar)	Q_{LC} (kvar)	C_N (Δ) (μF)	Typ	L_N (mH)	I_N (A)	m (kg)	W x D x H (mm)	Design	
5	4,44	27,4	TKC1-05-189/400/440	8,64	6,4	4,5	150 x 90 x 150	Cu / I	
6,25	5,6	34,3	TKC1-06,25-189/400/440	6,90	8,0	4,5	150 x 90 x 150	Cu / I	
10	8,9	54,8	TKC1-10-189/400/440	4,32	12,8	7,5	180 x 100 x 180	Cu / I	
12,5	11	68,5	TKC1-12,5-189/400/440	3,46	16,0	8,5	180 x 110 x 180	Cu / I	
14	12,5	76,7	TKC1-14-189/400/440	3,08	18,0	11	180 x 120 x 180	Cu / I	
15	13,3	82,2	TKC1-15-189/400/440	2,88	19,2	11	180 x 120 x 180	Cu / I	
20	17,8	110	TKC1-20-189/400/440	2,17	25,6	11	180 x 120 x 180	Cu / I	1 a 2 stupeň
25	22,2	137	TKC1-25-189/400/440	1,73	32,1	15	180 x 135 x 180	Cu / I	

5.2.3.2 Určení tlumivek pro stupně s výkonem 20 a 25 kvar

Hradící tlumivky NN se vypočtou a určí stejným způsobem jako v předchozím případě. Vypočtené parametry tlumivek pro stupně s výkonem 20 a 25 kvar jsou znázorněny v tabulce č. 4.

Tabulka 4: Výsledné parametry hradicích tlumivek pro jednotlivé stupně.

Kompenzační stupeň	Výkon hrazené sekce Q_{LC}	Reaktance tlumivky X_L	Indukčnost tlumivky L	Proud hrazené sekce I_{LC}
	[kvar]	[Ω]	[mH]	[A]
2. a 3. stupeň	19,99	0,602	1,92	28,85
4. a 5. stupeň	24,97	0,482	1,53	36

Pro kompenzační stupně s hodnotou kompenzačního výkonu 20 a 25 kvar se zvolí hradicí tlumivky NN z katalogu od firmy ELCOM, které mají stejné parametry jako výše uvedené hodnoty. Tyto tlumivky jsou znázorněny v tabulce č. 5.

Tabulka 5: Hradicí tlumivky NN z katalogu od výrobce ELCOM. [18]

Typové označení tlumivky EL-3L	22.400/440-e/7 22.400/440-f/7	25.400/400-e/7 25.400/400-f/7	28.400/440-e/7 28.400/440-f/7
Jmenovitý výkon kondenzátoru [kvar]	22,50	25,00	28,10
Kompenzační výkon sekce [kvar]	20,00	22,22	24,97
Jmenovité síťové napětí [V]	400	400	400
Rezonanční kmitočet [Hz]	189	189	189
Činitel zatlumení	7 %	7 %	7 %
Jmenovitý proud tlumivky [A]	28,9	32,1	36,0
Maximální efektní proud tlumivky [A]	34,11	37,9	42,6
Jmenovitá indukčnost tlumivky [mH]	1,92	1,73	1,53
Ztráty tlumivky [W]	60	80	73
Hmotnost [kg]	22,5	23,5	23,5

5.2.4 Výběr stykačů pro jednotlivé kompenzační stupně

Pro spínání kompenzačních stupňů se použijí stykače od výrobce ZES SILKO, který nabízí kondenzátorové stykače typu CC nebo K3-..K.

Pro tyto stupně se vyberou kondenzátorové stykače typu K3-..K, které jsou určeny pro spínání nízkoinдукtivních kondenzátorových baterií v kompenzačním rozvaděči. Tyto stykače dokážou spínat jak samotný kondenzátor, tak i kondenzátor s ochrannou tlumivkou. Stykače jsou opatřeny předstihovými kontakty a tlumivými odpory. Je to z důvodu toho, aby se snižovaly špičky zapínacího proudu na $<70 \times I_n$. [12]

Hlavní parametry, které jsou důležité pro volbu stykačů, jsou kompenzační výkon, napětí a proud hrazené sekce. Z předchozích výpočtů již tyto hodnoty byly stanovené. Pro první stupeň se požaduje kompenzační výkon 17,8 kvar, napětí 440 V a proud 25,65 A. Z katalogu byl zvolen kondenzátorový stykač s označením K3-24K00 230. Pro druhý a třetí kompenzační stupeň, kde se

vyžaduje výkon 20 kvar, napětí 440 V a proud hrazené sekce 28,85 A, se zvolí kondenzátorový stykač s názvem K3-32K00 230. U čtvrtého a pátého stupně, které mají výkon 25 kvar, napětí 440 V a proud 36 A, se vybere stykač K3-50K00 230. Všechny tyto kondenzátorové stykače jsou znázorněny v tabulce č. 6. [14]

Tabulka 6: Kondenzátorové stykače K3-..K z katalogu od výrobce ZES SILKO. [12]

Typ	Výkon (kvar)			Jmenovitý proud (A)	Frekvence spínání (za hodinu)	Elektrická životnost (sepnutí)	Pomocné kontakty	Rozměry W x D x H (mm) včetně vybíjecích odporů	
	380 - 400 V	415 - 440 V	660 - 690 V						
K3-18NK10 230	10	13	20	18	240	250 000	1 NO	45 x 85 x 98	
K3-18NK01 230	12,5	13	20	18	240	250 000	1 NC	45 x 85 x 98	
K3-24K00 230	20	22	33	28	240	150 000	-	45 x 115 x 119,5	1. stupeň
K3-32K00 230	25	27	41	35	240	150 000	-	45 x 115 x 119,5	2. a 3. stupeň
K3-50K00 230	33,3	36	55	48	120	150 000	-	60 x 145 x 128,5	4. a 5. stupeň
K3-62K00 230	50	53	82	72	120	150 000	-	60 x 145 x 128,5	
K3-74K00 230	75	75	120	105	80	120 000	-	60 x 145 x 128,5	
K3-90K00 230	80	82	120	115	80	120 000	-	90 x 155 x 152,5	
K3-115K00 230	100	103	148	144	80	120 000	-	90 x 155 x 152,5	

5.2.5 Volba pojistek a pojistkových odpínačů pro jednotlivé kompenzační stupně

V tomto návrhu budou pro jednotlivé stupně vybrány pojistky a pojistkové odpínače z katalogu od firmy OEZ. Použijí se nožové pojistkové vložky typu PNA1 s velikostí pojistkových spodků 1, jenž budou vloženy v pojistkových odpínačích typu FH1 s velikostí spodků 1. [14]

Tabulka 7: Nožové pojistkové vložky PNA1 z katalogu od výrobce OEZ. [19]

I _n [A]	Charakteristika gG				
	Typ	Objednávací kód	Ztráty [W]	Hmotnost [kg]	
16	PNA1 16A gG	OEZ:40428	2,10	0,30	
20	PNA1 20A gG	OEZ:40429	2,72	0,30	
25	PNA1 25A gG	OEZ:40430	2,80	0,30	
32	PNA1 32A gG	OEZ:40431	3,40	0,30	
35	PNA1 35A gG	OEZ:40432	3,20	0,30	
40	PNA1 40A gG	OEZ:40433	4,65	0,30	
50	PNA1 50A gG	OEZ:40434	4,62	0,30	1. stupeň
63	PNA1 63A gG	OEZ:40435	6,00	0,30	2. a 3. stupeň
80	PNA1 80A gG	OEZ:40436	7,50	0,30	4. a 5. stupeň
100	PNA1 100A gG	OEZ:40437	8,45	0,30	
125	PNA1 125A gG	OEZ:40438	10,70	0,30	
160	PNA1 160A gG	OEZ:40439	14,60	0,30	
200	PNA1 200A gG	OEZ:40440	15,00	0,44	
224	PNA1 224A gG	OEZ:40441	16,10	0,44	
250	PNA1 250A gG	OEZ:40442	18,20	0,44	

Pro provoz výše uvedených stykačů je nutné, aby byly pojistky zvoleny s charakteristikou gI (gG) a navrhnuty na 1,6 až 2,5x I_n. Tedy pro stykač K3-24K se použije pojistka s charakteristikou gG a proudem 50 A, což je kolem 1,78x I_n. Pro stykač s označením K3-32K se určí pojistka gG s proudem 63 A a pro poslední kondenzátorový stykač K3-50K se vybere pojistka gG s proudem 80 A. Všechny zvolené pojistkové vložky z katalogu jsou znázorněny v tabulce č. 7. [14]

Při vybírání pojistkových odpínačů je důležité, aby odpínače měly stejnou velikost pojistkových spodků jako pojistkové vložky. Velikost spodků je u pojistkových vložek 1, a proto se tedy vybere pro každý kompenzační stupeň shodný pojistkový odpínač s označením FH1-3A/F. Z tabulky č. 8 je použit zvolený pojistkový odpínač z katalogu od firmy OEZ.

Tabulka 8: Pojistkové odpínače FH1 z katalogu od firmy OEZ. [19]

I_n [A]	Počet pólů	Typ	Objednací kód	Hmotnost [kg]	Balení [ks]
250	1	FH1-1A/F	OEZ:14362	1,164	1
	3	FH1-3A/F	OEZ:14364	2,786	1
400	1	FH2-1A/F	OEZ:14369	1,280	1
	3	FH2-3A/F	OEZ:14368	2,980	1
630	1	FH3-1A/F	OEZ:14374	1,710	1
	3	FH3-3A/F	OEZ:14373	4,992	1

5.2.6 Volba regulátoru jalového výkonu

Kompenzační rozvaděč bude ještě obsahovat zařízení, kterému se říká regulátor jalového výkonu. Hlavní funkce tohoto zařízení je obměňovat hodnotu jalového výkonu v elektrické síti tak, aby byl vždy zajištěn žádaný účinník. Regulátor mění jalový výkon díky postupnému připojování a odpojování dílčích kompenzačních sekcí. V tomto návrhu bude použit regulátor Prophi, jenž nabízí německá firma Janitza electronics GmbH. [14]

Regulátor Prophi se používá pro stupňovité řízení účinníku v třífázových sítích s hladinou napětí NN. Může být aplikován jak v nechráněných kompenzacích, tak i v hrazených kompenzacích. Ovládá se pomocí tři tlačítek, které jsou umístěny na čelním panelu. Tento regulátor může být dodán s 6 nebo 12 reléovými výstupy. Tyto výstupy slouží pro řízení stykačů. [17]



Obrázek 25: Regulátor jalového výkonu Prophi. [17]

5.3 Návrh nové kompenzace pro napět'ovou hladinu 6 kV

Napět'ová hladina 6 kV obsahuje tři totožné asynchronní motory, které mají nižší účinník, než je uvedený v zadání návrhu, proto je nutné navrhnout novou kompenzaci tak, aby se účinník zvýšil na hodnotu $\cos\varphi_K = 0,97$. Pro tuto hladinu 6 kV bude navrhována individuální kompenzace, ve které se kompenzační baterie zapojí přímo na svorky motoru. Také individuální kompenzace bude navrhována jako hrazená. Jak již bylo zmíněno v předchozí kapitole, v síti se vyskytují harmonické, které mohou být nebezpečné z důvodu přetěžování kondenzátorů, což může mít za následek snížení životnosti kondenzátorů. Jedná se hlavně o pátou a sedmou harmonickou, které nejvíce přetěžují kondenzátory. [14]

Dále se zvolí důležitý parametr, kterým je činitel zatlumení p . Určí se s ohledem na nejmenší harmonickou, která se vyskytuje v elektrické síti, což je v tomto případě pátá harmonická s hodnotou frekvence 250 Hz a s ohledem na frekvenci, při kterém je vysílán signál HDO, což je hodnota frekvence 216 2/3 Hz. Rezonanční frekvence se zvolí $f_r = 189$ Hz a vybere se tedy stejná hodnota, jaká byla vybrána u napět'ové hladiny 0,4 kV, což je $p = 7\%$. [14]

Všechny tři asynchronní motory jsou stejné, takže se návrh nové kompenzace pro napět'ovou hladinu 6 kV zjednoduší. Postačí tedy vypočítat pouze kompenzační členek pro jeden asynchronní motor a stejný členek se použije pro všechny zbylé asynchronní motory. Kompenzační členek se skládá z kondenzátoru a hradicí tlumivky. [16]

5.3.1 Určení potřebného kompenzačního výkonu pro jeden asynchronní motor

Výpočet výkonu asynchronního motoru s 315 kW a účinníkem $\cos\varphi_1 = 0,84$:

$$P_{P1} = P_1 \cdot \beta_1 = 315 \cdot 10^3 \cdot 0,9 = 283,5 \text{ kW} \quad (5.28)$$

$$S_1 = \frac{P_{P1}}{\cos\varphi_1} = \frac{283,5 \cdot 10^3}{0,84} = 337,5 \text{ kVA} \quad (5.29)$$

$$Q_1 = \sqrt{S_1^2 - P_{P1}^2} = \sqrt{(337,5 \cdot 10^3)^2 - (283,5 \cdot 10^3)^2} = 183,12 \text{ kvar} \quad (5.30)$$

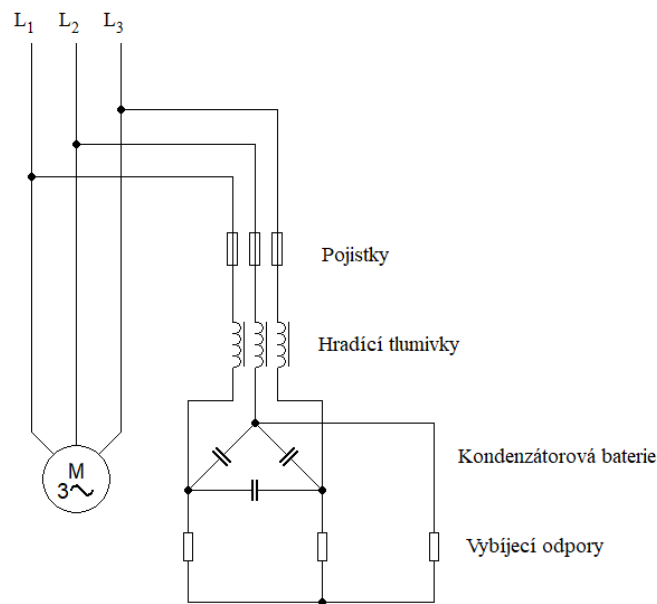
Výpočet potřebného kompenzačního výkonu s účinníkem $\cos\varphi_K = 0,97$:

$$S_K = \frac{P_{P1}}{\cos\varphi_K} = \frac{283,5 \cdot 10^3}{0,97} = 292,27 \text{ kVA} \quad (5.31)$$

$$Q_K = \sqrt{S_K^2 - P_{P1}^2} = \sqrt{(292,27 \cdot 10^3)^2 - (283,5 \cdot 10^3)^2} = 71,06 \text{ kvar} \quad (5.32)$$

$$Q_{komp} = Q_1 - Q_K = 183,12 \cdot 10^3 - 71,06 \cdot 10^3 = 112,1 \text{ kvar} \quad (5.33)$$

Tento potřebný kompenzační výkon je nutné dodat asynchronnímu motoru, aby byla zajištěna hodnota účinníku $\cos\varphi_K = 0,97$.



Obrázek 26: Zapojení individuální kompenzace.

5.3.2 Volba kompenzačních kondenzátorů VN

Pro kompenzaci asynchronního motoru se použijí trojfázové VN kondenzátory od výrobce VISHAY, které jsou v zapojení do trojúhelníku.

Jako první se vypočte proud, jenž protéká kondenzátorem:

$$I = \frac{Q_C}{\sqrt{3} \cdot U_S} = \frac{112100}{\sqrt{3} \cdot 6000} = 10,78 \text{ A} \quad (5.34)$$

Protože se jedná o hrazenou kompenzaci, tak je nutné respektovat vliv hradicí tlumivky. Sériové spojení tlumivky a kondenzátoru má za následek, že vzroste napětí na kondenzátoru na hodnotu U_C , a proto je nutné vypočítat, na jakou velikost napětí jsou kondenzátory konstruovány. [14]

Napětí na kondenzátoru U_C s uvažováním činitele ztlumení:

$$U_C = \frac{U_S}{1-p} = \frac{6000}{1-0,07} = 6451,6 \text{ V} \quad (5.35)$$

Vlivem tlumivky vzroste napětí na kondenzátoru na hodnotu 6451,6 V. Tahle uvedená hodnota je větší než napětí vyskytující se v elektrické síti $U_S = 6000$. Je tedy vyloučeno použití kondenzátor, jenž je dimenzován na jmenovitou sdruženou hodnotu 6000 V. Tudíž se použije kondenzátor, který je konstruován na napětíovou hladinu 7200 V.

Výpočet kapacity jednoho kondenzátoru C:

$$C = \frac{\frac{I}{\sqrt{3}}}{U_C \cdot 2 \cdot \pi \cdot f} = \frac{\frac{10,78}{\sqrt{3}}}{6451,6 \cdot 2 \cdot \pi \cdot 50} = 3,1 \text{ } \mu\text{F} \quad (5.36)$$

Dále se vyberou vhodné trojfázové VN kondenzátory z katalogu, jenž budou mít podobné hodnoty jako výše vypočítané parametry. Byl vybrán trojfázový kompenzační kondenzátor od firmy VISHAY pro napětíovou hladinu 7200 V a je uveden v tabulce č. 9. Zvolený kondenzátor má

kompenzační výkon 150 kvar, což je podstatně větší výkon, než je požadovaný kompenzační výkon s hodnotou 112,1 kvar. Použití většího výkonu vůbec nevadí, protože se stejně tento výkon zmenší vlivem hrazené kompenzace. Výhodou tohoto trojfázového VN kondenzátoru je taková, že má vestavěné vnitřní vybíjecí odpory, které snižují napětí na 75 V do 10 minut. [14]

Vypočte se následující vztah, aby bylo ověřeno, zda kondenzátorová baterie dokáže dodat potřebný kompenzační výkon i v zapojení s tlumivkou:

$$Q_{LC} = \frac{U_S^2}{(1-p) \cdot \left(\frac{U_{CN}^2}{Q_N}\right)} = \frac{6000^2}{(1-0,07) \cdot \left(\frac{7200^2}{150000}\right)} = 112,01 \text{ kvar} \quad (5.37)$$

Z výsledku lze zjistit, že skutečná hodnota kompenzačního výkonu Q_{LC} je nepatrně menší jako hodnota potřebného kompenzačního výkonu pro asynchronní motor, jenž má hodnotu 112,1 kvar. Pro tento návrh je to však zanedbatelný rozdíl.

Tabulka 9: Trojfázové kompenzační kondenzátory VN z katalogu od firmy VISHAY. [21]

3-PHASE CAPACITORS UP TO 7.2 kV, IP00								
RATED VOLTAGE U_N (kV)	OUTPUT Q_n AT 50 Hz (kvar)	OUTPUT Q_n AT 60 Hz (kvar)	IMPULSE (kVp)	CURRENT AT 50 Hz (A)	CURRENT AT 60 Hz (A)	CASING DIMENSIONS L x W x H (mm)	WEIGHT (kg)	FORM
7.2	25	30	60	2	2	345 x 110 x 300	22	1
7.2	50	60	60	4	5	345 x 110 x 300	22	1
7.2	75	90	60	6	7	345 x 110 x 300	22	1
7.2	100	120	60	8	10	345 x 110 x 330	24	1
7.2	150	180	60	12	14	345 x 135 x 370	30	1
7.2	200	240	60	16	19	345 x 135 x 470	36	1
7.2	300	360	60	24	29	345 x 135 x 630	47	1
7.2	400	480	60	32	39	345 x 175 x 635	58	1
7.2	550	660	60	44	53	345 x 175 x 825	73	1
7.2	700	840	60	56	67	345 x 175 x 1010	88	1
7.2	800	960	60	64	77	345 x 175 x 1155	100	1

5.3.3 Volba hradicích tlumivek VN

Aby byla správně vybrána hradicí tlumivka VN, tak je nutné vypočítat její základní parametry.

Nejprve se stanoví reaktance kondenzátoru X_C :

$$X_C = \frac{1}{C \cdot \omega} = \frac{1}{C \cdot 2 \cdot \pi \cdot f} = \frac{1}{3 \cdot 3,1 \cdot 10^{-6} \cdot 2 \cdot \pi \cdot 50} = 342,3 \, \Omega \quad (5.38)$$

Dále se vypočítá reaktance tlumivky X_L :

$$X_L = X_C \cdot p = 342,3 \cdot 0,07 = 23,96 \, \Omega \quad (5.39)$$

Poté se určí indukčnost L hradicích tlumivky:

$$L = \frac{X_L}{2 \cdot \pi \cdot f} = \frac{23,96}{2 \cdot \pi \cdot 50} = 76,3 \text{ mH} \quad (5.40)$$

Na závěr se stanoví proud kompenzačního článku I_{LC} :

$$I_{LC} = \frac{Q_{LC}}{\sqrt{3} \cdot U_S} = \frac{112010}{\sqrt{3} \cdot 6000} = 10,78 \text{ A} \quad (5.41)$$

Vybere se pomocí výše vypočítaných parametrů vhodné hradící tlumivky VN z katalogu. Vypočítaným údajům nejvíce odpovídají hradící tlumivky, které poskytuje výrobce ZES SILKO. Jedná se o tlumivky, které jsou dimenzovány pro kondenzátory se jmenovitým napětím 7200 V a pro rezonanční kmitočet 189 Hz. Vybranou tlumivku lze vidět v tabulce č. 10. [20]

Tabulka 10: Hradící tlumivky VN z katalogu od firmy ZES SILKO. [20]

Typ	PDF	Výkon kondenzátoru Q_N [kvar]	Indukčnost L_N [mH]	Proud I_N [A]	Rozměry (ŠxHxV) [mm]	Hmotnost [kg]
150-189/6000/7200	-	150	77,0	12	955 x 425 x 650	185
300-189/6000/7200	-	300	38,5	24	1215 x 475 x 700	267
600-189/6000/7200	-	600	19,25	48	1175 x 500 x 770	356

5.3.4 Volba pojistek VN

U individuální kompenzaci se kompenzační článek zapojuje na svorky asynchronního motoru. Takže není nutné mít v tomto návrhu spínací zařízení, protože se kompenzační článek připojí současně při zapínání asynchronního motoru. Je ale potřeba mít pojistky, které budou kompenzační článek jistit proti zkratu. Zvolí se tedy pojistkové vložky VN z katalogu od firmy ABB. Jedná se o pojistky typu CEF, které slouží k ochraně kondenzátorů. Pro provoz pojistek je nutné, aby byly dimenzovány minimálně na 1,3 až 1,5x jmenovitého proudu kompenzačního článku I_{LC} . Zvolená pojistka je znázorněna v tabulce č. 11. [16]

Výpočet jmenovitého proudu pojistky:

$$I = I_{LC} \cdot 1,5 = 10,78 \cdot 1,5 = 16,17 \text{ A} \quad (5.42)$$

Tabulka 11: Pojistkové vložky CEF z katalogu od výrobce ABB. [22]

Catalog number	Fuse name	Rated voltage U_n [kV]	Rated current I_n [A]	Rated frequency f_n [Hz]	Breaking capacity I_{cs} [kA]	Minimal breaking current I_{cs} [A]	Diameter D [mm]	Length e [mm]	Rated power P_n [W]	Cold resistance [mΩ]	Pre-arcing integral [A ² s]	Total interrupting integral [A ² s]	Weight [kg]	EAN13 Code
1YMB710713M1512	CEF	3/7.2	6.3	50	63	48	53	192	9	186.4	4.5	560	1.2	5908270806887
1YMB710716M1512	CEF	3/7.2	10	50	63	43	53	192	12	96.6	24	1 800	1.2	5908270806894
1YMB710718M1512	CEF	3/7.2	16	50	63	72	53	192	18	59.5	135	6 060	1.2	5908270806900
1YMB710719M1512	CEF	3/7.2	20	50	63	72	53	192	20	39.8	265	10 300	1.2	5908270806917
1YMB710721M1512	CEF	3/7.2	25	50	63	110	53	192	17	22.8	490	17 000	1.2	5908270806924
1YMB710724M1512	CEF	3/7.2	31.5	50	63	115	53	192	23	17.1	890	29 000	1.2	5908270806931
1YMB710725M1512	CEF	3/7.2	40	50	63	143.5	53	192	31	14.1	1600	49 000	1.2	5908270806948
1YMB710727M1512	CEF	3/7.2	50	50	63	215	53	192	32	9.4	3375	99 000	1.2	5908270806955

Závěr

Zásadním cílem této vypracované práce bylo vysvětlení a obeznámení se s teorií, jenž se týká kompenzace jalového výkonu. Hlavním úsilím bylo tuto práci zpracovat tak, aby byla odborně správně vypracována a aby měla co nejpřehlednější a nejsrozumitelnější znění. Další snahou bylo ukázat vlastní praktický návrh, na kterém se provedla kompenzace jalové energie za účelem zlepšení účinníku. Provedla se skupinová kompenzace pro nízké napětí a individuální kompenzace pro vysoké napětí.

Teoretická část bakalářské práce byla napsána tak, aby čtenáři jednak získali základní informace o kompenzaci jalové energie a také aby pochopili její princip a účel použití pro průmyslové odběratelé. V teoretické části byl čtenářům přiblížen samotný princip paralelního připojení kondenzátoru ke spotřebiči a nabídla se jim možnost se seznámit s hlavními kompenzačními prostředky pro kompenzaci a se základními druhy řízení kompenzačního výkonu.

Pro praktickou část práce byl navržen vlastní praktický návrh kompenzace pro fiktivní průmyslovou síť, která se z hodnoty napětí 22 kV transformovala na napětí 0,4 kV a 6 kV. Záměrem tohoto návrhu bylo tedy stanovit novou kompenzaci v obou uvedených napěťových hladinách na hodnotu účinníku $\cos\varphi_K = 0,97$.

Pro napěťovou hladinu 0,4 kV, ve které se nachází 8 asynchronních motorů, byla navržena skupinová kompenzace. Tato kompenzace byla vybrána hlavně z toho důvodu, aby asynchronní motory byly schopné fungovat buď samostatně nebo společně v odlišném časovém okamžiku. Skupinová kompenzace se použila jako hrazená, protože se v síti nacházely harmonické, které mohly být nebezpečné z důvodu přetěžování kondenzátorů. Aby byl dosažen účinník $\cos\varphi_K = 0,97$, tak bylo nutné dodat do sítě vypočítaný kompenzační výkon 107,2 kvar pomocí hrazeného kompenzačního rozvaděče se stupňovitou řízenou kompenzací. V kompenzačním rozvaděči se potřebný kompenzační výkon rozdělil na pět kompenzačních stupňů. Ve skutečnosti se jednotlivé stupně určí pomocí několika měření, aby se zajistila maximální efektivita pro různé případy zatížení. Pro navrhnutou fiktivní průmyslovou síť byly kompenzační stupně zvoleny tak, aby maximální efektivita byla hlavně u všech motorů. V kompenzačním rozvaděči se nachází tedy pět stupňů, kde každý z těchto stupňů obsahuje stykače, tlumivky, pojistky a kondenzátorovou baterii. Aby se vybraly vhodné uvedené prostředky z katalogů výrobců, tak bylo nutné vypočítat jednotlivé parametry pro každý kompenzační stupeň.

Pro napěťovou hladinu 6 kV, ve které se nachází 3 asynchronní motory, byla navržena individuální kompenzace. Tato kompenzace zabezpečí trvale a vhodné vykompenzování na žádanou hodnotu účinníku. Také individuální kompenzace bude navržena jako hrazená. Tento návrh byl zjednodušen tím, že všechny motory byly stejné, takže stačilo vypočítat pouze kompenzační člunek pro jeden asynchronní motor a obdobný výpočet se použil pro všechny zbylé asynchronní motory. Aby byl dosažen účinník $\cos\varphi_K = 0,97$, tak bylo nutné dodat do motoru vypočítaný potřebný kompenzační výkon 112,1 kvar. U individuální kompenzaci není nutné mít spínací zařízení, protože se kompenzační člunek zapojuje přímo na svorky motoru. Individuální kompenzace napěťové hladiny VN obsahuje pojistky, tlumivky, kondenzátorovou baterii a vybíjecí odpory. Bylo nutné vypočítat jednotlivé parametry, aby se vybraly vhodné uvedené prostředky z katalogů.

V současnosti se ceny elektrické energie neustále zvedají, takže zájem o kompenzaci jalového výkonu narůstá. Problematiku kompenzace jalové energie musí řešit nejenom odběratel, ale také distributor elektrické energie. Jestliže odběratel dodrží předepsaný účinník v požadovaných hodnotách, tak bude mít menší náklady za odběr elektřiny. Distributor se zase musí zabývat technickými problémy, které se vytvářejí nekompensovanými odběry, což má za následek ekonomické problémy jako například ztráty na vedeních apod. Lze tedy říct, že kompenzace jalového výkonu je a bude nadále důležitou součástí, jenž bude ovlivňovat kvalitu i cenu elektrické energie.

Použitá literatura

Tištěné zdroje:

- [1] KORENC, Vladimír a Jiří HOLOUBEK. *Kompenzace jalového výkonu v praxi*. 1. Praha: IN-EL, spol. s r.o., 1999, 127 s. ISBN 80-86230-07-4.
- [2] HRADÍLEK, Zdeněk. *Elektroenergetika distribučních a průmyslových zařízení*. Ostrava: VŠB-TU Ostrava ve vydavatelství Montanex, 2008, 364 s. ISBN 978-80-7225-291-6.
- [3] TOMAN, Petr, Jiří DRÁPELA, Stanislav MIŠÁK, Jaroslava ORSÁGOVÁ, Martin PAAR a David TOPOLÁNEK. *Provoz distribučních soustav*. 1. Praha: České vysoké učení technické v Praze, 2011, 263 s. ISBN 978-80-01-04935-8.
- [4] HODINKA, Miroslav, Štefan FECKO a František NĚMEČEK. *Přenos a rozvod elektrické energie*. 1. Praha: SNTL - Státní nakladatelství technické literatury, 1989, 323 s. ISBN 80-03-00065-3.

Elektronické zdroje:

- [5] doc. Dr. Ing. GURECKÝ, Jiří. Materiály pro výuku předmětu Přenos a rozvod elektrické energie [elektronická skripta]. [cit. 2019-04-19]. Dostupné z: http://fe1.vsb.cz/kat410/studium/studijni_materialy/prenos_a_rozvod_elektricke_energie.htm
- [6] ČEPS A.S. Technická infrastruktura. *ČEPS a.s.* [online]. [cit. 2019-04-19]. Dostupné z: <https://www.ceps.cz/cs/technicka-infrastruktura>
- [7] ČEPS A.S. Údaje o PS. *ČEPS a.s.* [online]. [cit. 2019-04-19]. Dostupné z: <https://www.ceps.cz/cs/udaje-o-ps>
- [8] GALETKA, Martin. Přenosová soustava elektrické energie. *Tzb-info* [online]. 2016 [cit. 2019-04-19]. Dostupné z: <https://energetika.tzb-info.cz/elektroenergetika/13676-prenosova-soustava-elektricke-energie>
- [9] Rozdělení elektrických zařízení podle napětí: Kategorie (pásmo) napětí. *Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava: Fakulta elektrotechniky a informatiky* [online]. [cit. 2019-04-19]. Dostupné z: http://fe1.vsb.cz/kat410/studium/studijni_materialy/informace/kategorie_napeti.htm
- [10] VISHAY. Power capacitors catalogue [online]. [cit. 2019-04-19]. Dostupné z: <http://www.vishay.com/docs/13004/phmkp-cylindrical.pdf>

- [11] KOŠTÁL, Josef. Kompenzace elektrického jalového výkonu. *ELEKTRO* [online]. 2009, (3) [cit.2019-04-19]. Dostupné z: <http://www.odbornecasopisy.cz/res/pdf/38682.pdf>
- [12] KOMPENZACE JALOVÉ ENERGIE. *ZEZ SILKO* [online]. 2018 [cit. 2019-04-19]. Dostupné z: <https://www.zez-silko.cz/customzone/files/pfcnewcz.pdf>
- [13] Kompenzace jalové energie. *EMG ZLÍN* [online]. [cit. 2019-04-19]. Dostupné z: https://www.emgzlin.cz/menu/kompenzace-o_kompenzac.html
- [14] POSPÍŠIL, Zdeněk. *KOMPENZACE JALOVÉHO VÝKONU PRŮMYSLOVÉHO ODBĚRATELE*. Brno, 2013. Bakalářská práce. VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav elektroenergetiky. Vedoucí práce Doc. Ing. Petr Toman, Ph.D. Dostupné z: https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_veřejne.php?file_id=68863
- [15] HANZELKA, Jiří. *Kompenzace jalového výkonu průmyslového odběratele*. Brno, 2015. Bakalářská práce. VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav elektroenergetiky. Vedoucí práce Doc. Ing. Petr Toman, Ph.D. Dostupné z: https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_veřejne.php?file_id=102094
- [16] MIŠINGER, Ondřej. *Kompenzace jalového výkonu průmyslového odběratele*. Brno, 2011. Bakalářská práce. VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav elektroenergetiky. Vedoucí práce Doc. Ing. Petr Toman, Ph.D. Dostupné z: https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_veřejne.php?file_id=40148
- [17] Regulátor jalového výkonu Prophi. *KBH Energy* [online]. 2007 [cit. 2019-04-19]. Dostupné z: <http://www.kbh.cz/produkty/prophi/popis-a-technicka-data>
- [18] OCHRANNÉ TLUMIVKY PRO KOMPATIBILNÍ KOMPENZÁTORY ÚČINÍKU. *ELCOM* [online]. 2019 [cit. 2019-04-19]. Dostupné z: <https://www.elcom.cz/cz/produkty/silnopruda-elektrotechnika/prumyslove-napajeci-systemy/kompenzace-a-filtrace/ochranné-tlumivky-pro-kompatibilni-kompenzatory-uciniku/ochranné-tlumivky>
- [19] OEZ. *Pojistkové systémy* [online]. 1. 2016 [cit. 2019-04-19]. Dostupné z: file:///C:/Users/pc/Downloads/va01_2016_cz.pdf
- [20] Hradící tlumivky VN. *ZEZ SILKO* [online]. [cit. 2019-04-19]. Dostupné z: <https://www.zez-silko.cz/cs/produkty/hradici-tlumivky-vn>

- [21] VISHAY. Power capacitors catalogue [online]. [cit. 2019-04-19]. Dostupné z: <https://www.vishay.com/docs/13181/phahvac3phase.pdf>
- [22] ABB SP. Z O.O. *Medium-voltage fuses 3 kV – 40.5 kV, 0.4 A – 315 A* [online]. 2018 [cit. 2019-04-19]. Dostupné z: <https://search-ext.abb.com/library/Download.aspx?DocumentID=2401PL1613-W1-en&LanguageCode=en&DocumentPartId=&Action=Launch>

Seznam obrázků

Obrázek 1: Schéma vedení obsahující uvedené elektrické parametry. [2]	15
Obrázek 2: Paprskový rozvod NN. [3]	18
Obrázek 3: Okružní rozvod NN. [3]	18
Obrázek 4: Zjednodušený mřížový rozvod. [3]	19
Obrázek 5: Fázorový diagram proudu a napětí u kapacitních a induktivních spotřebičů.	20
Obrázek 6: Posuv napětí a proudu induktivního spotřebiče	21
Obrázek 7: Posuv napětí a proudu kapacitního spotřebiče	22
Obrázek 8: Síť bez kompenzace, s částečnou kompenzací a s úplnou kompenzací jalového výkonu. ..	23
Obrázek 9: Fázorový diagram výkonů před a po kompenzaci.	24
Obrázek 10: Schéma paralelní kompenzace.	24
Obrázek 11: Fázorový diagram paralelní kompenzace	25
Obrázek 12: Schéma zapojení při individuální kompenzaci. [2]	27
Obrázek 13: Schéma zapojení při skupinové kompenzaci. [2]	28
Obrázek 14: V-křivky synchronního stroje. [2]	30
Obrázek 15: Snadný sériový RLC členek. [2]	32
Obrázek 16: Kmitočtové charakteristiky C, L a LC filtru. [1]	33
Obrázek 17: Schéma obvodu fázově ovládaného induktivního proudu. [2]	35
Obrázek 18: Schéma obvodu fázově ovládaného kapacitního proudu.	35
Obrázek 19: Časové průběhy napětí a proudů ze schématu s kondenzátorem. [2]	36
Obrázek 20: Schéma zapojení plynule ovládaného kompenzátoru v trojfázové síti. [1]	36
Obrázek 21: Schéma zapojení paralelního aktivního filtru, který je zapojen do sítě. [2]	37
Obrázek 22: Schéma zapojení sériového aktivního filtru, který je zapojen do sítě. [2]	38
Obrázek 23: Schéma návrhu kompenzované sítě	39
Obrázek 24: Hrazený kompenzační rozvaděč se stupňovitou kompenzací	42
Obrázek 25: Regulátor jalového výkonu Prophi. [17]	47
Obrázek 26: Zapojení individuální kompenzace.	49

Seznam tabulek

<i>Tabulka 1: Trojfázové kompenzační kondenzátory NN z katalogu od firmy VISHAY. [10]</i>	43
<i>Tabulka 2: Výsledné hodnoty kondenzátorů pro jednotlivé stupně.</i>	44
<i>Tabulka 3: Hradící tlumivky NN z katalogu od firmy ZES SILKO. [12]</i>	44
<i>Tabulka 4: Výsledné parametry hradících tlumivek pro jednotlivé stupně.</i>	45
<i>Tabulka 5: Hradící tlumivky NN z katalogu od výrobce ELCOM. [18]</i>	45
<i>Tabulka 6: Kondenzátorové stykače K3-..K z katalogu od výrobce ZES SILKO. [12]</i>	46
<i>Tabulka 7: Nožové pojistkové vložky PNA1 z katalogu od výrobce OEZ. [19]</i>	46
<i>Tabulka 8: Pojistkové odpínače FH1 z katalogu od firmy OEZ. [19]</i>	47
<i>Tabulka 9: Trojfázové kompenzační kondenzátory VN z katalogu od firmy VISHAY. [21]</i>	50
<i>Tabulka 10: Hradící tlumivky VN z katalogu od firmy ZES SILKO. [20]</i>	51
<i>Tabulka 11: Pojistkové vložky CEF z katalogu od výrobce ABB. [22]</i>	51